REDUKTION DER DEUTERANOPIE AUS DER NORMALEN TRICHROMASIE

von

Angelika Kröger-Paulus

1979

Aus dem Physiologischen Institut, Lehrstuhl II
der Universität Düsseldorf
Direktor: Professor Dr. J. Haase

REDUKTION DER DEUTERANOPIE

AUS

DER NORMALEN TRICHROMASIE

vorgelegt
von

ANGELIKA KRÖGER-PAULUS

DISSERTATION
Zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin der
Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf
1979

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität Düsseldorf

Der Dekan
der Medizinischen Fakultät
der Universität Düsseldorf
gez.: Prof. Dr. H.-L. Krüskemper

Referent:
Prof. Dr. H. Scheibner
Korreferent:
Prof. Dr. H. Pau

Meinen Eltern gewidmet

Inhaltsverzeichnis

	Seite
I. Einleitung	1
II. Allgemeine Grundlagen	2
1. Definition und Grundlagen der Farbmetrik	2
2. Farbenfehlsichtigkeiten	7
3. Die Deuteranopie als eine Form der Dichromasie	8
4. Fehlfarben und Prinzip der Fehlfarbenbestimmung	11
5. Reduktion der Trichromasie auf die Deuteranopie	13
6. Alychnen und Prinzip der Alychnenbestimmung	15
7. Reduktion der Trichromasie auf eine Quasimonochromasie	19
8. Berechnung der Schnittspur der Alychne mit der Farbtafel	22
9. Wechsel des Bezugssystems	24
10. Deuteranopischer Farbenraum	25
III. Aufgabenstellung	29
IV. Methodik	30
1. Versuchspersonen	30
2. Apparatur	31
3. WDW-System und spezielle deuteranopische Normierung	34
4. Kalibrierung des Dreifarbenmeßgerätes - Umrechnung ins Normvalenzsystem	35
V. Versuchsdurchführung	43
1. Fehlfarben	43
2. Alychnen	44
3. Neutrale Zone	46

Seite

VI. Ergebnisse 47

1. Fehlfarben der Deuteranopen 47

a. WDW-System 47

b. CIE-System 52

2. Reduktion der Trichromasie auf die Deuteranopie 58

3. Deuteranopische Primärvalenzen 61

4. Alychne und Reduktion auf eine Quasimonochromasie 65

5. Neutrale Zone 75

6. Ergebnisse bei der deuteranomalen Versuchsperson 76

VII. Diskussion 80

1. Fehlfarbe 80

2. Neutrale Zone 86

3. Alychne 87

4. Testen der Clusterhypothese mit Hilfe des H-Tests 90

5. Reduktionsdeuteranopie oder Fusionsdeuteranopie 92

6. Deuteranomalie 94

VIII. Zusammenfassung 97

IX. Schrifttum 99

I. EINLEITUNG

Farbenfehlsichtigkeiten bzw. Abweichungen vom normalen Farbempfinden waren schon sehr früh bekannt. Erstmalig erwähnt werden sie 1777 von Priestly. Im Jahre 1794 beschrieb Dalton seine eigene Farbanomalie. Nach den heutigen Kenntnissen handelte es sich wahrscheinlich um eine Protanopie (zitiert nach (12)). Seebeck differenzierte dann 1837 erst zwischen "Rotblinden" und "Grünblinden" (94). Eine noch heute gültige Klassifizierung der Farbenfehlsichtigkeiten findet sich bei Nagel (55), der Dichromaten von anomalen Trichromaten unterscheidet. Genaue Untersuchungen von Farbenfehlsichtigkeiten und die Beschreibung der Abweichung vom normalen Farbempfinden waren an die Möglichkeit zur quantitativen Analyse der Abweichung gekoppelt. Letzteres wurde ermöglicht durch die Konstruktion von Farbenmischapparaten. König (39) konstruierte aufgrund genauerer Ausarbeitungen der Young-Helmholtzschen Theorie des Farbensehens den Helmholtz-Königschen Farbenmischapparat.

Für die vorliegende Arbeit stand ein visuelles Dreifarbenmeßgerät nach Beck und Richter (11) zur Verfügung, mit dessen Hilfe die Untersuchungen an fünf deuteranopischen Versuchspersonen durchgeführt wurden. Das Ziel der Untersuchungen war, Fehlpunkte und Alychnen (84) für Deuteranopen zu bestimmen; ein Vergleich mit einem Deuteranomalen wurde durchgeführt.

II. ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

1) Definitionen und Grundlagen der Farbmetrik

Bei der Messung von Farben muß man unterscheiden zwischen physikalisch definierten Farbreizen und empfindungsgemäß definierten Farbvalenzen. Während die physikalisch definierten Farbreize aufgrund rein physikalischer Meßvorgänge objektiv beschreibbar sind, ist auf der anderen Seite bei der Beschreibung von Farbvalenzen ausschließlich die Bewertung des Auges maßgebend. Vom Auge werden elektromagnetische Strahlungen oder elektromagnetische Schwingungen in einem Wellenlängenbereich von etwa 380 bis 780 nm wahrgenommen (19).

Die Menge aller möglichen Farbreize besteht aus der Kombination von Strahlungen beliebiger Wellenlängen bei jeweils beliebiger Intensität.
Somit sind Spektralfarbreize, da sie nicht kombinierte Farbreize sind, ein Sonderfall und stellen den geringeren Anteil aller möglichen Farbreize dar. Da die Wellenlänge eine stetige Größe darstellt, ist schon mit den Spektralfarbreizen eine theoretisch unendlich große Menge von Farbreizen gegeben.
Das Auge kann hingegen nur ungefähr 10^6 Farben unterscheiden (66, S.79). Es muß also eine Informationsreduktion oder, mengentheoretisch, eine Klassenbildung stattfinden. Diese Informationsreduktion wird nach der Äquivalenzre-

lation des gleichen Aussehens beschrieben, d.h. für das Auge sind eine bestimmte Menge verschiedener Farbreize ununterscheidbar. Diese Klasse von Farbreizen wird vom Auge zu e i n e r Farbempfindung zusammengefaßt, die Farbvalenz genannt wird (81).
Die Farbvalenz ist eine physiologische Begriffsbildung und ausschließlich abhängig von der individuellen Bewertung des Auges. Sie ist demnach auch bei verschiedenartigen Farbenfehlsichtigkeiten verschieden.

Wie mißt man Farben?
Die Messung von Farbreizen erfolgt durch Vergleich mit anderen als Maß definierten Farbreizen. In der niederen Farbmetrik (66, S.123 ff,93) geschieht dies durch das Kriterium des gleichen Aussehens. Nach dem oben gesagten können hiermit zwei als gleich beurteilte Farben von durchaus physikalisch verschiedener Reizverteilung sein (81, 66, S. 83ff).
Im einfachsten Falle, beim Nachtsehen oder skotopischen Sehen, werden nur Helligkeitsunterschiede wahrgenommen. Alle Farbwahrnehmungen sind auf die Wahrnehmung von verschiedenen Grautönen zwischen Weiß und Schwarz reduziert. Demnach beschränkt sich die Farbmessung beim Nachtsehen auf reines Skalieren von Hellempfindungen. Jede beliebige Farbmessung in diesem Bereich ist damit eine eindimensionale Operation, die auf ihrer Skala lediglich Helligkeitsunterscheidungen enthält. Am überschaubarsten ist, bei dunkeladaptiertem Auge, das Vermessen von Spektralfarbreizen. Mit <u>einem</u> Meßfarbreiz kann man alle anderen

Wellenlängen gleich aussehend einstellen. Hat man diese vorher auf ein bestimmtes, gleichenergetisches Niveau eingestellt, so ergibt die dabei entstandene Funktion die relative Empfindlichkeit aller möglichen spektralen Strahlungsreize in Bezug auf eine Bezugswellenlänge, z.B. 500 nm, wieder.

Versucht man dies auf das photopische Sehen auszudehnen, so stellt man fest, daß ein beliebiges Vermessen mit e i n e m beliebigen Vergleichsreiz nicht möglich ist. Man braucht dazu drei verschiedene Farbreize, bei denen der dritte nicht durch die beiden ersten nachmischbar sein darf. So ist z.B. die Farbempfindung Gelb nachmischbar durch einen grünen und einen roten Farbreiz. Hingegen würde man mit einem Farbreiztripel grün/gelb/rot z.B. keine blaue Farbe nachmischen können. Es ist eine Erfahrungstatsache, daß man drei und nur drei verschiedene Meßfarben benötigt. Mit vier Farbreizen würde man keine eindeutigen Ergebnisse mehr erhalten. Es wäre demnach der vierte mit irgendeiner oder mehreren anderen Bezugsfarben austauschbar. Dieses Prinzip wird im folgenden ausgenutzt, um bei den Farbfehlsichtigen, bei denen zwei verschiedene Farbreize zur Messung genügen, den Bezug zwischen Trichromasie und Dichromasie herzustellen.
Die Bedingung, daß drei und nur drei verschiedene, nicht nachmischbare Farben zur Messung verwendet werden müssen, wird algebraisch durch die Tatsache der linearen Unabhängigkeit (24, S. 40ff., 45, S. 223ff.) beschrieben. Dementsprechend

kommt man nicht umhin, einen dreidimensionalen Raum zur Darstellung zu benutzen:
Während beim skotopischen System eine Gerade, d.h. die jeweilige Intensität einer schwarz-weißen Farbe zur Beschreibung ausreicht, muß beim Deuteranopen, d.h. bei einem dichromatischen System mit zwei Unabhängigen, eine Ebene benutzt werden, während beim Trichromaten eben ein dreidimensionaler Raum erforderlich ist (81, 82, 85).
Da im Rahmen der Farbvalenzmetrik nur gleichaussehende Farben miteinander verglichen werden und demzufolge keine Abstände innerhalb der Farben definiert sind, ist es nicht notwendig, ein orthogonales Koordinatensystem zu benutzen.

Jedes schiefwinklige Koordinatensystem, das einen Raum aufspannt, d.h. dessen Grundvektoren nicht in einer Ebene liegen, ist zur Darstellung geeignet. In dieses Koordinatensystem werden üblicherweise Punkte nach der sogenannten Parallelogrammregel eingetragen. Diese Parallelogrammregel folgt nach der Gleichung

$$\vec{C} = B \cdot \vec{B} + G \cdot \vec{G} + R \cdot \vec{R},$$

wobei $\vec{B}$, $\vec{G}$, und $\vec{R}$ die Grundvektoren oder Primärvalenzen darstellen und B, G, R die dazugehörigen Farbwerte.

Parallel zu diesem mathematischen Raum, in dem lediglich die Richtungen der drei Einheitsvektoren und deren Länge definiert werden, müssen im Meßsystem die Bezugsfarbreize, sinnvollerweise spektrale Farbreize, und deren entsprechender Länge des Einheitsvektors, deren Intensität, definiert werden. In der Definition der Intensität ist man vollkommen

frei. Dieses Prinzip der freien Normierbarkeit durchzieht das gesamte Gebiet der Farbmetrik. Bei der Beschreibung eines gemessenen Farbreizes erhält man demnach drei Größen, die das Vielfache der Bezugsfarben oder Primärvalenzen wiedergeben. Diese drei Größen entsprechen den Skalaren des zugehörigen Vektors im mathematischen Raum.
Um demzufolge die gemessene Farbvalenz mathematisch einordnen zu können, müssen die Skalare nach der Parallelogrammregel mit jedem Grundvektor multipliziert und aufaddiert werden.

Von besonderem Interesse ist auch hier wieder das Vermessen der Spektralfarben. Bietet man der Versuchsperson ein äquienergetisches Spektrum an und trägt man die von Wellenlänge zu Wellenlänge erhaltenen Skalare in den Farbenraum ein, so erhält man die sogenannte Spektralfarbentüte. Diese Spektralfarbentüte ist unabhängig von den verwendeten Primärvalenzen. Würde man ein beliebiges anderes, linear unabhängiges Primärvalenztripel benutzen und dies in den gleichen Farbenraum eintragen, so würde doch die gleiche Spektralfarbentüte wieder daraus resultieren, die damit gleichsam die Meßeigenschaften des Auges wiederspiegelt. Jeder spektrale Farbreiz läßt sich auch durch eine vektorielle Farbgleichung (s. S. 5) darstellen. Trägt man die skalaren Anteile aller möglichen spektralen Farbreize über der Wellenlänge auf, so resultieren drei Spektralwertkurven bezogen auf die verwendeten Primärvalenzen.

2) Farbenfehlsichtigkeit

Das normale trichromatische Farbensehen ist an das Vorhandensein von drei verschieden absorbierenden Sehpigmenten gebunden. Nach Rushton (70,71) werden diese in den Sehzapfen lokalisierten Sehpigmente "Erythrolab", "Chlorolab" und "Cyanolab" genannt. Dabei ist Erythrolab das in langen Wellenlängenbereichen absorbierende Sehpigment, während Chlorolab in mittleren Wellenlängenbereichen und Cyanolab im kurzwelligen Bereich absorbiert.

Für eine Abweichung vom normalen Farbensehen bestehen auf der Grundlage der photochemischen Pigmente prinzipiell zwei Möglichkeiten: Die erste Möglichkeit besteht im Ausfall eines Pigmentes, die zweite in einer sogenannten Alteration eines Pigmentes, d.h. in einer Veränderung eines Pigmentes mit der Folge einer Verschiebung des Absorptionsmaximums. Im ersten Fall würde man von einer Dichromasie sprechen. Entsprechend den drei Möglichkeiten für den Ausfall eines Pigmentes, spricht man von Protanopie bei Fehlen von Erythrolab, Deuteranopie bei Fehlen von Chlorolab, Tritanopie bei Fehlen von Cyanolab.
Die alterierten Pigmente belegt man mit den Namen Protanolab, Deutanolab und Tritanolab (70).
So spricht man bei Alteration des langwelligen Pigmentes von einer Protanomalie. Um eine Deuteranomalie handelt es sich bei Verschiebung des Absorptionsmaximums des

mittleren Pigmentes, entsprechend um eine Tritanomalie bei Veränderung des kurzwelligen Pigmentes.
Während Proto- und Deuterostörungen vorwiegend vererbt werden, kommen Tritostörungen auch häufig erworben — bei bestimmten Retinopathien — vor.
Fallen z w e i Zapfenpigmente aus, so spricht man von einer Zapfenmonochromasie (5). In diesem Fall ist keine Buntwahrnehmung mehr möglich. Es werden lediglich Helligkeitsunterschiede von Unbunt — Schwarz bis Weiß — gesehen.
Protanope und Deuteranope dagegen erkennen im Spektrum eine Verteilung von Bunttönen, die aus Blau und Gelb besteht, mit einem unbunten Bereich in der Mitte (neutrale Zone), der für die Deuteranopen zwischen 490 und 505 nm liegt.

3) Die Deuteranopie als eine Form der Dichromasie

Seit über hundert Jahren geht in der Literatur die Diskussion über zwei Erklärungsmöglichkeiten der Deuteranopie.
Die eine Hypothese betrachtet die Deuteranopie als Reduktionsform der normalen Trichromasie, bei der wie bei den anderen Dichromasieformen ein Pigment, also das Chlorolab, ausgefallen ist; die zweite Hypothese wird als Verschiebungshypothese bezeichnet, die daraus folgende Form der Dichromasie als Fusions-

dichromasie. Unter Fusion versteht man dabei eine Verschmelzung der beiden langwelligen Mechanismen. Grund zu dieser Diskussion gibt auf der einen Seite die starke Streuung der deuteranopischen Fehlpunkte, auf der anderen Seite eine dem normalen Trichromaten ähnelnde Verteilung der spektralen Hellempfindlichkeit.

Schon 1873 vertrat Aitken (1) die Ansicht, daß der Deuteranope sowohl das normale rote wie das normale grüne Pigment habe, daß aber eine Fusionierung dieser beiden Pigmente auf neuronaler Ebene stattfinden müsse. Zur gleichen Zeit sprachen sich auch Leber und Fick für die Fusion der langwelligen Grunderregungskurven aus (46, 104).
Pitt und Judd nahmen um 1945 diese Hypothese wieder auf (31,62,104).

Willmer forderte 1949 (111) die Unterscheidung zwischen zwei Typen der Deuteranopie, wobei an den Typ Willmer I vor allem eine Forderung gestellt wird: er soll die gleiche Hellempfindlichkeitskurve wie ein normaler Trichromat haben.
Unter Typ Willmer II versteht man dann eine Reduktionsdeuteranopie mit einem "normalen" Erythrolab als langwelligem Pigment. Diese Reduktionsform zeichnet sich durch eine deutlich zu langen Wellenlängen verschobene spektrale Hellempfindlichkeit aus.

Unter den Gegnern der Fusionshypothese finden sich Rushton, Alpern und Vos und Walraven (4, 71, 73, 103); sie konnten mit verschiedenen Methoden nur ein langwelliges Pigment nachweisen.
Trotzdem beobachteten auch Alpern und Rushton eine große Streuung der deuteranopischen Fehlpunkte wie Nyberg und Justova (56), Nimeroff (57) und Scheibner und Boynton (83)

Alpern vermutete nach Untersuchung eines Deuteranopen mit normaler spektraler Hellempfindlichkeitskurve, daß eine fehlende Makulapigmentierung dafür verantwortlich sei (4).
In drei neueren Arbeiten über Deuteranopie und Deuteranomalie vertritt Alpern die sog. Clusterhypothese zu Erklärung der offensichtlichen Variationen innerhalb der Deuteranopie (6, 7, 8). Er dehnt diese Erklärungsmöglichkeit als allgemeines Prinzip aus. Demnach besitzt der Deuteranop ein kurzwelliges Pigment aus dem Cyanolab-Cluster und ein langwelliges Pigment aus dem Erythrolab-Cluster. Gemäß dieser Hypothese basiert das anomale Farbensehen auf einem Pigment aus einem Cluster und zwei alterierten Pigmenten aus einem zweiten Cluster (6, 7, 8).

4) Fehlfarben und Prinzip der Fehlfarbenbestimmung

Die Fehlfarben stellen einmal den Zusammenhang zwischen Dichromasie und Trichromasie her; gleichzeitig ermögliche sie durch ihre Lage in der Farbtafel eine Charakterisieru der Dichromasie.

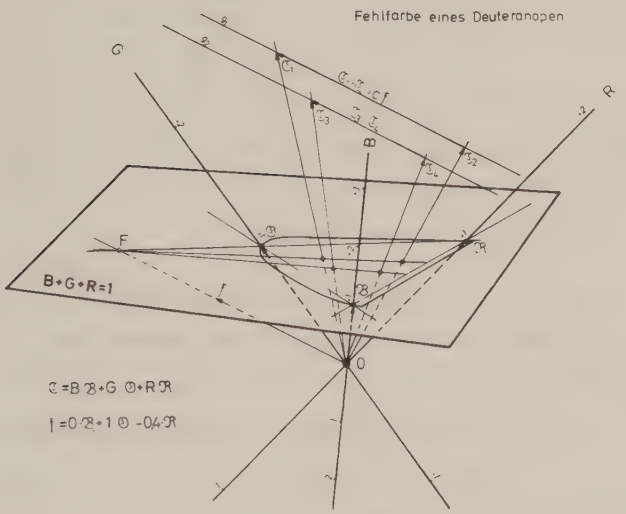


Abb. 1: Trichromatischer, von den Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$, $\vec{R}$ aufgespannter Farbenraum. In der Einheitsebene B + G + R = 1 ist die zugehörige Farbtafel mit dem Spektralfarbenzug eingezeichnet. Sowohl $\vec{C}_1$ und $\vec{C}_2$ als auch $\vec{C}_3$ und $\vec{C}_4$ sind für einen Deuteranopen ununterscheidbar, ihre Differenzen sind, bis auf einen Längenfaktor c, gleich dem Fehlfarbenvektor $\vec{f}$. F: Fehlpunkt.

Die Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$, $\vec{R}$ spannen den trichromatischen Farbenraum auf. B + G + R = 1 ist die Einheitsebene; in ihr liegt die Farbtafel mit dem Spektralfarbenzug. Betrachtet man die Farbreize $\vec{C}_1$ und $\vec{C}_2$, die für den Trichromaten deutlich unterschiedliche Farben darstellen, so sind diese für den Deuteranopen gleich. Der Vektor $\vec{C}_1 - \vec{C}_2 = \vec{O}$ stellt also die Richtung der Fehlfarbe im Raum dar. Bildet man auch für die Farbreize $\vec{C}_3$ und $\vec{C}_4$, die für den Deuteranopen ununterscheidbar sind, den Differenzvektor, so sieht man, daß er zu $\vec{C}_1 - \vec{C}_2$ parallel läuft.

Der Fehlfarbenvektor hat also e i n e bestimmte Richtung. Trägt man einen solchen Differenzvektor vom Nullpunkt des Farbenraumes auf, so durchstößt er die Farbtafel im Fehlpunkt F (82,91).

Je zwei Farbörter, deren Farben für einen Dichromaten ununterscheidbar sind, bestimmen eine Verwechslungsgerade (91). Prinzipiell lassen sich Fehlfarben aus nur zwei geeigneten Farben bestimmen, indem man einen Farbreiz vom Dichromaten auf zwei verschiedene Weisen abgleichen läßt (91). Diese Methode der Fehlfarbenbestimmung findet man bei Schrödinger und später auch bei Nyberg und Justowa (93, 56).
Für die Fehlfarbenbestimmung werden zwischen den Farbwerten des Ausgangsreizes und den Farbwerten der dichromatischen Nachmischungen die Differenzen gebildet:

B_o, G_o, R_o = Farbwerte des Ausgangsreizes;

B_i, G_i, R_i = Farbwerte des i-ten Reizes, der mit B_o, G_o, R_o die zugehörigen Farbwerte eines Differenzvektors be-

stimmt gemäß:

$B_i - B_o$, $G_i - G_o$, $R_i - R_o$, $\quad i = 1, 2, 3 \ldots n.$

So entsteht eine bestimmte Anzahl (n) von Differenzvektoren oder Fehlfarben:

$$\vec{O} = (B_i - B_o)\cdot\vec{B} + (G_i - G_o)\cdot\vec{G} + (R_i - R_o)\cdot\vec{R},$$

$i = 1, 2, 3 \ldots n.$

Mit Hilfe von projektiven Koordinaten kann man eine mittlere Fehlfarbe ermitteln (90). Die Farbwerte für eine solche mittlere Fehlfarbe lauten dann:

$$\frac{B_i - B_o}{G_i - G_o}; \qquad \frac{G_i - G_o}{G_i - G_o}; \qquad \frac{R_i - R_o}{G_i - G_o}.$$

Der Quotient $\frac{G_i - G_o}{G_i - G_o}$ ist vereinbarungsgemäß gleich eins.

$\vec{O} = B_m\cdot\vec{B} + G_m\cdot\vec{G} + R_m\cdot\vec{R}$ lautet die Gleichung für die mittlere Fehlfarbe.

Der Sinn dieses Mittelungsverfahrens liegt darin, den Einfluß der Länge jedes Differenzvektors auszuschließen und eine reine Richtungsmittelung anzustreben (90, 58).

5) Reduktion der Trichromasie auf die Deuteranopie

Die Fehlfarbe leistet, wie in Abschnitt II, 4 erwähnt, den Übergang von der Trichromasie auf eine Dichromasie. Dabei spannt die Fehlfarbe den eindimensionalen Unterraum auf, der bei der Abbildung eines dreidimensionalen Raumes auf einen zweidimensionalen verschwindet (81, 82).

Man betrachtet den eindimensionalen Unterraum, den die Fehlfarbe aufspannt, als den Kern einer homomorphen Abbildung, der das Gleichungssystem in der homogenen Form festlegt (91,58).

$$(1) \qquad \begin{aligned} O &= a_{11} \cdot B + a_{12} \cdot G + a_{13} \cdot R \\ O &= a_{21} \cdot B + a_{22} \cdot G + a_{23} \cdot R \end{aligned}$$

Gl. (1) beschreibt die Abbildung von Vektoren, die ausschließlich im Kern liegen.

Der Übergang zum inhomogenen Fall ergibt das Gleichungssystem in der folgenden Form:

$$(2) \qquad \begin{aligned} K &= a_{11} \cdot B + a_{12} \cdot G + a_{13} \cdot R \\ W &= a_{21} \cdot B + a_{22} \cdot G + a_{23} \cdot R \end{aligned}$$

K und W sind Farbwerte bezogen auf dichromatische Primärvalenzen $\vec{K}$ und $\vec{W}$.
Gl. (2) beschreibt die Abbildung von beliebigen Vektoren, also auch von solchen, die nicht im Kern liegen.

Zur Bestimmung des Gleichungssystems (1) betrachtet man $\vec{f}$, den Vektor der experimentell bestimmten Fehlfarbe. Dann lautet die Gleichung des Kerns:

$$(3) \qquad \vec{C} = u \cdot \vec{f},$$

wo u ein freier Parameter ist. Im BGR-System lautet diese Gleichung:

$$(4) \qquad B \cdot \vec{B} + G \cdot \vec{G} + R \cdot \vec{R} = u \cdot B_f \cdot \vec{B} + u \cdot \vec{G} + u \cdot R_f \cdot \vec{R},$$

wo (B_f, 1, R_f) die Farbwerte der Fehlfarbe, normiert auf $G_f = 1$, sind.

Gleichung (4) zerfällt in die drei skalaren Gleichungen:

$$\begin{aligned} B &= u \cdot B_f \\ G &= u \\ R &= u \cdot R_f \end{aligned} \tag{5}$$

Der Parameter u wird eliminiert, indem u durch G ersetzt wird (da G = u). Das führt unmittelbar auf die homogene Form der Abbildung:

$$\begin{aligned} O &= B - B_f \cdot G \\ O &= -R_f \cdot G + R \end{aligned} \tag{6}$$

in Matrizenform geschrieben:

$$\begin{pmatrix} O \\ O \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -B_f & O \\ O & -R_f & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B \\ G \\ R \end{pmatrix} \tag{7}$$

Die Gleichung für die allgemeine Abbildung lautet:

$$\begin{pmatrix} K \\ W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -B_f & O \\ O & -R_f & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B \\ G \\ R \end{pmatrix} \tag{8}$$

6) Alychnen und Prinzip der Alychnenbestimmung

Im dreidimensionalen Farbenraum bezeichnet man Ebenen konstanter Helligkeit als "Isolychnen", was "Gleichhelle" heißt (93). Die Ebenen konstanter Leuchtdichte laufen im Farbenraum parallel und schneiden die Farbtafel in parallelen

Geraden. Bezogen auf die Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$, $\vec{R}$ lautet die Gleichung für eine Isolychne L_i:

$L_i = \beta \cdot B + \gamma \cdot G + \rho \cdot R,$

wo L_i, β, γ und ρ Konstanten sind.

β, γ, ρ sind die sog. Leuchtdichtebeiwerte und B, G und R die Farbwerte im oben genannten Primärvalenzsystem.

Diese Beziehung, Abney'sches Gesetz genannt, beschreibt den Beitrag der einzelnen Farbwerte zur Gesamtleuchtdichte (58, 67, 90).

Die Ebene konstanter Leuchtdichte, die den Nullpunkt enthält, nennt man "Alychne" (Lichtlose), d.h. sie hat die Leuchtdichte Null (93).

Die Alychne schneidet die Farbtafel in einer Geraden, der Schnittpunkt der Alychne.

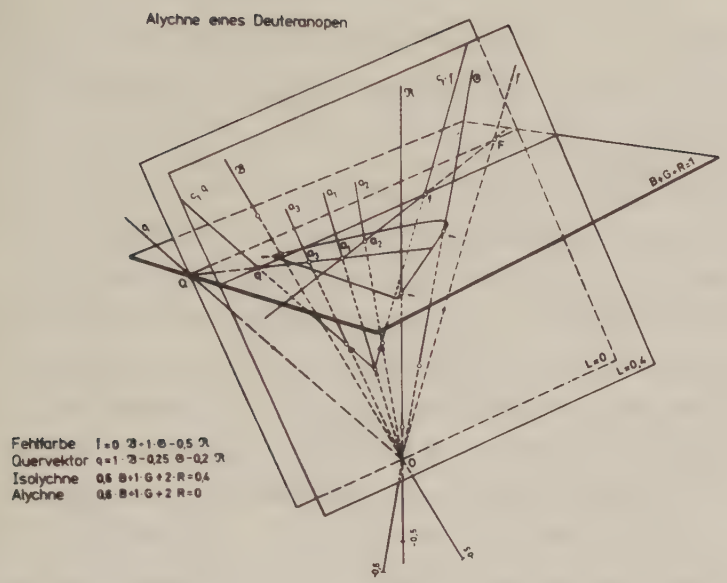


Abb. 2 zeigt die Darstellung der deuteranopischen Alychne (20). Im dreidimensionalen Farbenraum, gegeben durch die Einheitsvektoren $\vec{B}$, $\vec{G}$, $\vec{R}$, ist der Farbvektor $\vec{a}_1$ die Resultierende einer vektoriellen Addition aus drei Komponenten. Der Schnittpunkt mit der Einheitsebene ergibt den Farbort a_1 in der Farbtafel. Die Fehlfarbe f ist vom Nullpunkt angetragen und durchstößt die Einheitsebene im Fehlpunkt F. Sind $\vec{a}_1$ und $\vec{f}$ im Farbenraum komplanar, so bedeutet das für die projektive Darstellung in der Einheitsebene, daß a_1 und F kollinear sind, d.h. auf einer Gerade liegen. Ein Quervektor $\vec{q}$ wird ebenfalls vom Nullpunkt angetragen. Sein Schnittpunkt mit der Einheitsebene ist der Punkt Q. Auch $\vec{q}$ und $\vec{a}_1$ verhalten sich im Raum komplanar, so daß für Q und a_1 ebenfalls die Kollinearität gilt. $\vec{q}$ und $\vec{f}$ können vom Ursprung zum Endpunkt von $\vec{a}$ parallelverschoben angetragen werden. Die resultierenden Vektoren $c_1 \cdot \vec{q}$ und $c_1 \cdot \vec{f}$ spannen im Farbenraum eine Ebene gleicher Helligkeit, Isolychne, auf. Die Projektion von $c_1 \cdot \vec{q}$ und $c_1 \cdot \vec{f}$ in der Farbtafel ergibt die Punkte q und f, die ebenfalls kollinear sind und die Schnittspur einer Isolychne bilden. Die Schnittspur der Isolychne verläuft parallel zur Schnittspur der Alychne. Die Farbtafelebene wird durch die Lage der Einheitsebene B + G + R = 1 dargestellt. Die geometrische Konstruktion basiert auf den Gleichungen, die links unten in der Abbildung angegeben sind. Den Gleichungen von Fehlfarbe und Quervektor liegen abgerundete, mittlere, experimentell ermittelte Werte von deuteranopischen Versuchspersonen zugrunde; aus ihnen ergeben sich rechnerisch die Gleichungen für Alychne und Isolychne.

Eine Isolychne, als Ebene im dreidimensionalen Farbenraum, kann mit Hilfe von zwei freien Parametern u und v wie folgt beschrieben werden (90):

$$\vec{C} = \vec{a}_1 + u \cdot \vec{f} + v \cdot \vec{q} \quad , \tag{9}$$

wo $\vec{C}$ als variabler Ortsvektor in einem variablen Punkt der Ebene endet. $\vec{a}_1$ ist ein fester Ortsvektor, der in einem festen Punkt der Isolychne endet (s. Abb. 2). Von $\vec{a}_1$ ausgehend, sind die Richtungsvektoren $\vec{f}$ und $\vec{q}$ aufgetragen, die koplanar in der Isolychne liegen und zueinander nicht parallel sein dürfen. In Abb. 2 sind die beiden Vektoren $\vec{f}$ und $\vec{q}$ noch einmal als Ortsvektoren vom Nullpunkt angetragen. Sie spannen die Alychne mit L = O auf, wobei L für Leuchtdichte steht. In der Isolychne mit L = O,4 nehmen die beiden Vektoren $\vec{f}$ und $\vec{q}$, die koplanar in dieser Isolychne liegen, ihren Ausgang vom Ortsvektor $\vec{a}_1$. Sie spannen als Differenzvektoren diese Isolychne auf. Sie sind in Abb. 2 mit $c_1 \cdot \vec{f}$ und $c_1 \cdot \vec{q}$ bezeichnet, da es sich um Richtungsvektoren handelt, bei denen es auf die Länge nicht ankommt. Die Ortsvektoren $\vec{f}$ und $\vec{q}$, die die Alychne mit L = O aufspannen, sind die Parallelen zu $c_1 \cdot \vec{f}$ und $c_1 \cdot \vec{q}$, die den Nullpunkt enthalten.

Die Richtung des Vektors $\vec{f}$ wird bestimmt durch die Lage der Farbvalenz $\vec{a}_2$ (Abb. 2), insofern als $\vec{a}_1$ und $\vec{a}_2$ für den Deuteranopen ununterscheidbar sind, während sie für den Trichromaten deutlich unterscheidbar sind. Es gilt also für den Deuteranopen $\vec{a}_2 - \vec{a}_1 = c_1 \vec{f}$, wobei $\vec{f}$ die Fehlfarbe des Deuteranopen ist. Der Differenzvektor $\vec{f}$ liegt in einer Isolychne, da ununterscheidbare Farben auch gleich hell sind. Für die Bestimmung des Quervektors wird eine dritte Farbvalenz, in

Abb. 2, $\vec{a}_3$, benötigt. $\vec{a}_3$ wird heterochrom zur Ausgangsfarbvalenz $\vec{a}_1$ gleich hell eingestellt. Somit ist der Quervektor ein Differenzvektor, für den gilt $\vec{a}_1 - \vec{a}_3 = \vec{q} \cdot c_1$. $\vec{q}$ liegt ebenfalls in der Isolychne, die damit durch $\vec{q}$ und $\vec{f}$ bestimmt wird.

Eine Ebene im dreidimensionalen Farbenraum wird somit durch zwei Vektoren verschiedener Richtung bestimmt. Diese sind durch die Fehlfarbe und den sog. Quervektor gegeben. Der Quervektor ist ein reiner Chrominanzvektor (85), wo "Chrominanz" das farbmetrische Korrelat der Buntheit (19) ist. Man erhält ihn durch heterochrome Helligkeitsabgleiche, d.h. auch für den Dichromaten deutlich ungleiche Farben sollen gleich hell abgeglichen werden. Die Schwierigkeit bei solchen Abgleichen besteht darin, daß auch für den Dichromaten keine Farbgleichheit zu erzielen ist. Dieses wäre nur für einen Zapfenmonochromaten möglich, der nur noch Helligkeitsunterschiede beurteilen kann.

7) Reduktion der Trichromasie auf eine Quasimonochromasie

Die Alychne ist die Isolychne, bei der

a) der Ausgangsreiz $\vec{a}_1$ gleich Null ist und damit

b) die Leuchtdichte L gleich Null ist

(vgl. Abb. 2 und Gleichung 9, S. 18).

Die vektorielle Ebenengleichung lautet allgemein:

(10) $\vec{c} = u \cdot \vec{f} + v \cdot \vec{q}$

wobei $\vec{f}$ durch die vektorielle Gleichung der Fehlfarbe

(s. S. 13) und $\vec{q}$ durch die vektorielle Gleichung des Quervektors, der koplanar, aber nicht parallel zur Fehlfarbe liegt, beschrieben werden kann.

$$\vec{f} = B_F \cdot \vec{B} + G_F \cdot \vec{G} + R_f \cdot \vec{R} \tag{11}$$

$$\vec{q} = B_Q \cdot \vec{B} + G_Q \cdot \vec{G} + R_Q \cdot \vec{R} \tag{12}$$

Die Gleichung der Alychne beschreibt den Kern der Abbildung eines dreidimensionalen Raumes auf einen eindimensionalen, der nur noch Helligkeitsinformation enthält (81, 82, 90).

Durch Einsetzen von (11) und (12) in Gleichung (10) ergibt sich für die Alychne folgende Gleichung:

$$\vec{C} = u \cdot (B_F \cdot \vec{B} + G_F \cdot \vec{G} + R_F \cdot \vec{R}) + v \cdot (B_Q \cdot \vec{B} + G_Q \cdot \vec{G} + R_Q \cdot \vec{R}) \tag{13}$$

Diese vektorielle Ebenengleichung zerfällt in drei skalare Gleichungen folgender Form:

$$\begin{aligned} B &= u \cdot B_F + v \cdot B_Q \\ G &= u \cdot G_F + v \cdot G_Q \\ R &= u \cdot R_F + v \cdot R_Q \end{aligned} \tag{14}$$

Dies ist die Gleichung der Alychne in Parameterform, komponentenweise geschrieben. Die Parameter u und v werden eliminiert, so daß B, G, R selbst die unabhängigen Variablen sind. Das Ergebnis ist die gesuchte Abbildungsgleichung in ihrer homogenen Form:

(15) $O = (G_F \cdot R_Q - R_F \cdot G_Q) \cdot B + (R_F \cdot B_Q - B_F \cdot R_Q) \cdot G + (B_F \cdot G_Q - G_F \cdot B_Q) \cdot R$

Dies ist die Abney'sche Gleichung für alle Farbvektoren, die in der Alychne enden (97). Die allgemeine Form der Abney'schen Gleichung ergibt sich durch den Übergang zur inhomogenen Form der Abbildungsgleichung:

(16) $L = (G_F \cdot R_Q - R_F \cdot G_Q) \cdot B + (R_F \cdot B_Q - B_F \cdot R_Q) \cdot G + (B_F \cdot G_Q - G_F \cdot B_Q) \cdot R$

Den Klammerausdrücken der Abbildungsgleichungen entsprechen die Leuchtdichtebeiwerte ß, γ und ρ. Durch Einsetzen in Gleichung (16) erhält man die allgemeine Form der Abney'schen Gleichung für die Leuchtdichte:

(17) $L = ß \cdot B + \gamma \cdot G + \rho \cdot R$

Die Leuchtdichtebeiwerte können auf $\gamma = 1$ normiert werden, um sie besser vergleichen zu können.

Die Gleichung der Alychne leistet den Übergang von der Trichromasie auf die Quasimonochromasie. Sie enthält ausschließlich Helligkeitsinformation. Die Anwendung dieser Gleichung auf die drei trichromatischen Spektralwertkurven $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{r}(\lambda)$ führt zu einer spektralen Hellempfindlichkeitsinformation $\bar{l}(\lambda)$ (43, 58, 90).
Abb. 21 zeigt das Ergebnis der Reduktion der drei trichromatischen Spektralwertkurven $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{r}(\lambda)$ zu e i n e r spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion $\bar{l}(\lambda)$ am Beispiel der deuteranopischen Versuchsperson J.M..

8) Berechnung der Schnittspur der Alychne mit der Farbtafel

Beim Übergang von der Betrachtung der Farbvalenzen im Farbenraum zur projektiven, d.h. ebenen Darstellung werden aus Farbwerten, bezogen auf das jeweilige Primärvalenztripel, Farbwertanteile als Koordinaten der ebenen Darstellung in der Farbtafel (66, S. 57 ff.). Die Farbtafel ist ein Farbdreieck, dessen Eckpunkte durch die Farbarten der Primärvalenzen gebildet werden (44 , S.30ff.) Die Farbwertanteile lassen sich wie folgt aus den Farbwerten berechnen:

$$(18) \qquad r = \frac{R}{R+G+B}; \quad g = \frac{G}{R+G+B}; \quad b = \frac{B}{R+G+B}$$

Für die Farbwertanteile gilt:

$$(19) \qquad r + g + b = 1$$

Die Farbtafel kann als Einheitsebene im BGR-Farbenraum aufgefaßt werden. Damit kann man die Einheitsebene wie folgt beschreiben:

$$(20) \qquad R + G + B = 1$$

Diese Ebene schneidet die Raumachsen in den Einheitspunkten (1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1).
Die Alychnengleichung beschreibt, wie in Abschn. II, 6 erwähnt, ebenfalls eine Ebene im Farbenraum, die aber i. allg. zur Einheitsebene nicht parallel verläuft. Gesucht wird die Gerade, in der sich die beiden Ebenen schneiden. Man nennt diese Gerade die Alychnenspur.

Die Gleichung der Alychne ist aus Abschnitt II, 6 Gl. (17) bekannt:

(17) $O = \beta \cdot B + \gamma \cdot G + \rho \cdot R.$

Aus Gleichung (20) folgt:

$B = 1 - R - G$ eingesetzt in Gleichung (17)

$O = \beta \cdot (1 - G - R) + \gamma \cdot G + \rho \cdot R$, oder

$O = \beta - \beta \cdot G - \beta \cdot R + \gamma \cdot G + \rho \cdot R.$

Dies ist die Gleichung einer Geraden in der Einheitsebene. Da die Farbtafel als Einheitsebene im BGR-Farbenraum aufgefaßt werden kann, ist der Übergang von den Farbwerten B, G, R zu den Farbwertanteilen b, g, r möglich.

$O = \beta - \beta \cdot g - \beta \cdot r + \gamma \cdot g + \rho \cdot r$, oder

(21) $$g = \frac{\beta - \rho}{\gamma - \beta} \cdot r - \frac{\beta}{\gamma - \beta} \quad .$$

Dies ist die Gleichung einer Geraden in der Farbtafel von der allgemeinen Form $y = mx + b$.
Eine Gerade ist bestimmt durch zwei Punkte. In dem Fall der Alychnenspur sind die sie bestimmenden zwei Punkte durch den Farbort der Fehlfarbe und den Farbort eines Quervektors - als Durchstoßpunkte durch die Farbtafel - bekannt. Diese Betrachtungsweise führt zu einer zweiten Möglichkeit der Ableitung der Geraden der Alychnenspur. Die Aufstellung der Geradengleichung erfolgt nach der Zweipunkte-Gleichung von der allgemeinen Form:

$$\frac{y - y_1}{x - x_1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

Die Anwendung dieser Gleichung auf die Farbwertanteile der Alychne und des Quervektors ergibt für die Steigung m der Alychnenspur folgende Beziehung, wobei der Index F für Fehlfarbe und Q für Quervektor steht:

$$m = \frac{g_F - g_Q}{r_F - r_Q}.$$

m ist die Steigung einer Geradengleichung in der Farbtafel von der Form:

(22) $$g = m \cdot r + b.$$

Für das absolute Glied b in der Gleichung (22) ergibt sich ebenfalls nach der Zweipunkte-Gleichung

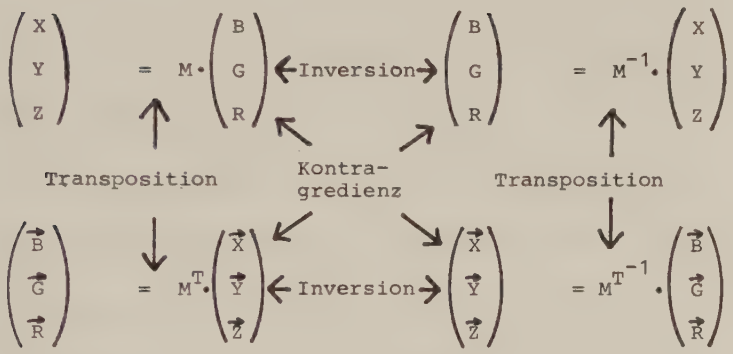
$$b = \frac{g_Q \cdot r_F - r_Q \cdot g_F}{r_F - r_Q}.$$

Damit ist der Schnittpunkt der Alychnenspur mit der Ordinate, das ist die g-Achse in der Farbtafel, bestimmt.

9) Wechsel des Bezugssystems

In dieser Arbeit sind zwei Bezugssysteme der Farbmetrik von Bedeutung, nämlich das BGR- oder WDW-System (nach William David Wright,112) und das CIE-System (19). Die Beziehung zwischen den Bezugssystemen wird durch eine Matrix festgelegt. Infolgedessen geschehen alle Transformationen nach den Regeln der Transformations-

theorie (24, S. 88ff.; 44, S. 161ff.; 45, S. 389ff.).



Die transponierte Matrix unterscheidet sich von der ursprünglichen durch Vertauschen von Zeilen und Spalten. M^{-1} ist die inverse Matrix zu M. Unter Kontragredienz versteht man die aufeinanderfolgende Inversion und Transposition der Matrix M.
Leuchtdichtebeiwerte werden wie Primärvalenzen transformiert (84).

10) Deuteranopischer Farbenraum

Die Eckpunkte eines Farbdreiecks liegen mit den Primärvalenzen fest. Die zu einer Primärvalenz gehörige Spektralwertfunktion wird vom Standpunkt der Transformationstheorie durch die gegenüberliegende Dreiecksseite bestimmt (48, 79). Betrachtet man z.B. in Abb. 15 das Farbdreieck, das durch die Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$, $\vec{R}$ gegeben ist,

so wird die zu $\vec{R}$ gehörende Spektralwertfunktion $\bar{r}(\lambda)$ durch die $\vec{B}$ und $\vec{G}$ verbindende Gerade bestimmt. Anders formuliert: Die Wahl der Primärvalenzen bestimmt die Form der Spektralwertkurven.

In Abschnitt II, 4 wird die Fehlfarbe als eindimensionaler Kern einer homomorphen Abbildung aufgefaßt, mit deren Hilfe die Trichromasie auf die Deuteranopie reduziert wird. Die Ausdehnung der Reduktion auf Primärvalenzen führt zur Betrachtung eines deuteranopischen Farbenraumes, eingebettet in dem trichromatischen Farbenraum.

Die Reduktion eines dreidimensionalen Farbenraumes auf einen zweidimensionalen (Abschnitt II, 5) führt von den trichromatischen Farbwerten (B, G, R) zu den dichromatischen Farbwerten (K, W). Über die Abbildung der zugehörigen Primärvalenzen ist damit noch nichts ausgesagt.

Es soll hier ein Weg angegeben werden, wie man die Reduktion auch für Primärvalenzen durchführen kann (36).

Das Gleichungspaar (23) (vgl. Gl. (8))

$$\begin{aligned} K &= 1 \cdot B \\ W &= a \cdot G + 1 \cdot R \end{aligned} \qquad (23)$$

ist das Ergebnis der Reduktion der Farbwerte. Die Matrix der Gleichung (23) ist eine Rechteckmatrix, die nicht invertiert werden kann und deshalb nach dem allgemeinen Transformationsschema (s. II, 9) nicht auf die gesuchten Primärvalenzen $\vec{K}$ und $\vec{W}$ führt. Um eine kontragrediente Matrix angeben zu können, muß das Gleichungssystem (23) auf ein Gleichungssystem mit einer quadratischen Matrix erweitert werden. Dazu wird ein dritter Farbwert

angenommen, der im Prinzip frei wählbar ist. Er wird so gewählt, daß er sich aus den Farbwerten G und R zusammensetzt wie die Fehlfarbe $\vec{D}$ selbst: $\vec{D} = \vec{G} - a \cdot \vec{R}$.
Damit lautet das um den Farbwert D ergänzte Gleichungssystem (23):

$$\begin{aligned} K &= 1 \cdot B \\ W &= a \cdot G + 1 \cdot R \\ D &= 1 \cdot G - a \cdot R \end{aligned} \qquad (23a)$$

Zu dieser quadratischen Matrix:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a & 1 \\ 0 & 1 & -a \end{pmatrix}$$

kann man durch Transposition und Inversion die kontragrediente Matrix bestimmen:

$$M^{T^{-1}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{a}{a^2+1} & \frac{1}{a^2+1} \\ 0 & \frac{1}{a^2+1} & -\frac{a}{a^2+1} \end{pmatrix}$$

Diese leistet nun die gesuchte Abbildung des Vektorraumes, der durch die Primärvalenzen $(\vec{B}, \vec{G}, \vec{R})$ aufgespannt wird, auf den Vektorraum, der die Primärvalenzen $(\vec{K}, \vec{W}, \vec{D})$ zur Basis hat. Die Transformation ist beschrieben durch das folgende Gleichungssystem, das sich durch Einsetzen der kontragredienten Matrix ergibt:

$$\vec{K} = 1\cdot\vec{B} + 0\cdot\vec{G} + 0\cdot\vec{R}$$

$$\vec{W} = 0\cdot\vec{B} + \frac{a}{a^2+1}\cdot\vec{G} + \frac{1}{a^2+1}\cdot\vec{R} \qquad (24)$$

$$\vec{D} = 0\cdot\vec{B} + \frac{1}{a^2+1}\cdot\vec{G} - \frac{a}{a^2+1}\cdot\vec{R}$$

Dabei ist $\vec{D}$ bis auf einen konstanten Faktor gleich der Fehlfarbe. Das durch $(\vec{K}, \vec{W}, \vec{D})$ gegebene trichromatische Primärvalenzsystem zeichnet sich dadurch aus, daß man die Primärvalenz $\vec{D}$ einfach weglassen kann ($\vec{D}$ ist die Fehlfarbe), um zum angestrebten dichromatischen Primärvalenzsystem $(\vec{K}, \vec{W})$ zu kommen.

In der trichromatischen Farbtafel bedeutet die Verbindungsgerade zwischen $\vec{K}$ und $\vec{W}$ die deuteranopische Farbtafel (Mischungsgerade), d.h. in der trichromatischen Farbtafel stellt sich die dichromatische als Gerade dar.

Variationen der Lage der Verbindungsgeraden zwischen $\vec{K}$ und $\vec{D}$ bedeuten eine Variation in der Form der Kurve $\bar{w}(\lambda)$. In Abb. 15 ist dargestellt, wie das Maximum der $\bar{w}(\lambda)$-Kurve mit Änderungen in der deuteranopischen Fehlfarbe variiert (42).

III. AUFGABENSTELLUNG

1) Es sollen deuteranopische Fehlfarben gemessen werden.
Die Fehlfarbe dient als Kern einer homomorphen Abbildung von einem dreidimensionalen auf einen zweidimensionalen Farbenraum, die zur Aufstellung deuteranopischer Spektralwertkurven führt. Die so gewonnenen langwelligen Spektralwertkurven der deuteranopischen Versuchspersonen sollen mit der Absorptionskurve des Zapfenpigmentes Erythrolab verglichen werden.

2) Es sollen deuteranopische Alychnen bestimmt werden.
Sie stellen den Kern einer homomorphen Abbildung eines dreidimensionalen Farbenraumes auf einen eindimensionalen Helligkeitsraum dar. Eine solche Reduktion soll zur Aufstellung einer spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion des Deuteranopen führen.

3) Die Ergebnisse der Fehlfarben- und Alychnenbestimmung sollen in das System des farbmetrischen Normalbeobachters transformiert werden.

4) Statistisch soll geprüft werden, ob die Fehlfarben bzw. das langwellige Sehpigment der deuteranopischen Versuchspersonen aus einer Grundgesamtheit stammen.
Kann Alpern's "Clusterhypothese" (7) (s. II, 3) bestätigt werden?

5) Welche Wellenlänge charakterisiert die neutrale Zone der jeweiligen Versuchsperson?

6) Zum Vergleich soll eine deuteranomale Versuchsperson mit der gleichen Methode untersucht werden.

IV. METHODIK

1) Versuchspersonen

Die Versuchspersonen waren männliche Medizinstudenten; sie wurden mit 8,- DM pro Stunde entlohnt. Die Diagnose der Farbenfehlsichtigkeit wurde mit dem Nagelschen Anomaloskop (gemäß der FNF-Anweisung (22)), dem Farnsworth-Munsell 100 Hue-Test (F 100) und dem Farnsworth-Dichotomous Test (D 15) gestellt. Anhand dieser Untersuchungsergebnisse sollen im folgenden die Versuchspersonen charakterisiert werden:

1) J. M., 25 Jahre, sicherer Deuteranop nach der FNF-Anweisung (22), am Farnsworth-Munsell 100 Hue-Test (F 100) typisches Deutan-Profil, total-error-score 263, am Farnsworth-Dichotomous Test (D 15) typische Deutan-Geraden.
2) C. Sch., 22 Jahre, am Nagelschen Anomaloskop sicherer Deuteranop, am F 100 typisches Deutan-Profil, total-error-score 235, am D 15 Verwechslungen in Richtung der Deutan-Geraden.
3) P. V., 26 Jahre, sichere Deuteranopie am Nagelschen Anomaloskop, am F 100 typisches Deutan Profil, total-error-score 166, am D 15 Verwechslungen im Sinne der Deutan-Geraden.

4) R. Sch., 24 Jahre, am Nagelschen Anomaloskop sicherer Deuteranop, der F 100 zeigt ein Deutan Profil mit total-error-score 236, am D 15 typische Deutan-Fehler.
5) U. W., 30 Jahre, am Nagelschen Anomaloskop sichere Deuteranopie, am F 100 kein typisches Deutan Profil, jedoch eindeutige Verwechslungen im Sinne eines Deutan-Typs, total-error-score 104, D 15 schlecht reproduzierbar, beim ersten Test wenige, nicht eindeutige Deutan-Fehler, beim Retest Verwechslungen vom Deutan-Typ.
6) H. St., 22 Jahre, am Nagelschen Anomaloskop Deuteranomalie mit sehr unsicherer absoluter Einstellung (42 Teilstriche), $0{,}23 \leq AQ \leq 3{,}1$ und halbextremer Umstimmbarkeit (69 Teilstriche, bis zur roten Grenzgleichung), F 100 angedeutetes Deutan Profil, total-error-score 60, am D 15 zweimal fehlerlos.

2) Apparatur

Die Versuche wurden mit einem modifizierten Dreifarbenmeßgerät nach Guild-Bechstein (11) (Hersteller: Schmidt u. Haensch, Berlin), durchgeführt. Abb. 3 (91) zeigt schematisch den Aufbau des Gerätes. Die Versuchsperson schaut durch die Austrittspupille (AP) auf ein rundes, zweigeteiltes Photometerfeld von $1{,}7^{\circ}$ Durchmesser. Für die Durchführung der Versuche wurde das Umlenkprisma (U_3) entfernt und der Strahlengang der Wechseloptik angeschlossen. Die verschiedenen Ausgangsreize im linken

Photometerfeld kamen durch Zusammenwirken des kalibrierten Interferenzverlaufsfilters (IF), eingestellt auf die Wellenlänge 452 nm, mit dem Entsättigungsstrahlengang (BL geöffnet) zustande. Dort wurde ein Absorptionsfilter OG 530 der Dicke 2 mm (Hersteller: Firma Schott u. Gen., Mainz) eingebracht. Die Intensität der spektralen Strahlung von 452 nm wurde durch einen drehbaren Graukeil und teilweise durch ein zusätzliches Graufilter der optischen Dichte von 1,6 variiert.

Die rechte Photometerhälfte wurde über das rotierende Prismensystem RP ausgeleuchtet: Die instrumentellen Primärvalenzen wurden mit Hilfe von Farbfiltern vor einer gemeinsamen Glühlampe (G) erzeugt, die additive Mischung dieser drei Lichter erfolgte durch ein rotierendes Prismensystem (RP), also nach dem Kreiselprinzip (91). Durch Ersetzen der Trübglasscheibe durch eine Mattscheibe (SS_1) zwischen Glühlampe und Primärvalenzfilter sollte eine größere Leuchtdichte des Photometerfeldes erreicht werden. Der Nachteil des in der Peripherie nicht ganz homogenen Photometerfeldes wurde durch den geringen Durchmesser von 1,5 mm der Austrittspupille (AP) ausgeglichen.

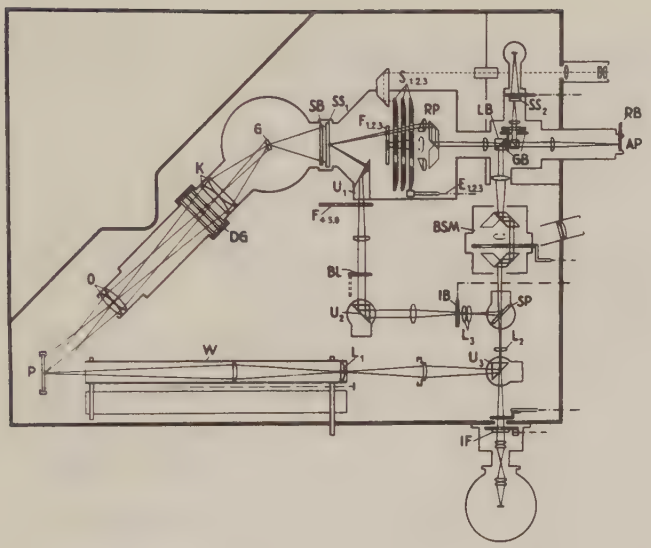


Abb. 3: Visuelles Dreifarbenmeßgerät nach Guild-Bechstein. Es bedeuten AP: Austrittspupille; BL: Blende, schwenkbar; BSM: BRODHUN-Sektorenmeßvorrichtung; DG: DAVIS-GIBSON-Filter; $E_{1,2,3}$:Triebknöpfe; $F_{1,2,3}$: Farbfilter; $F_{4,5,6}$: Farbfilter; G: Glühlampe; GB: Gesichtsfeldblende; IB: Irisblende; IF: Interferenzverlaufsfilter; K: Kondensor; L_1: Linse; L_2: Linse; L_3: Linse; LB: LUMMER-BRODHUN-Würfel; O: Objektiv; P: Probe; RB: Revolverblende; RP: Rotierendes Prismensystem; $S_{1,2,3}$: Sektorenpaare; SB: Siebblende; SP: Spiegelplatte; SS_1: Streuscheibe; SS_2: Streuscheibe; U_1: Umlenkprisma; U_2: Umlenkprisma; W: Wechseloptik.

Die Primärvalenzfilter waren Interferenzfilter (Hersteller: Jenaer Glaswerk Schott u. Gen., Mainz). Für Blau und Grün wurden Doppelbandfilter des Typs DEPAL,

a) λ_{max} = 459 nm, HW = 18 nm; b) λ_{max} = 458 nm, HW = 18 nm; c) λ_{max} = 531 nm, HW = 16 nm; d) λ_{max} = 531 nm, HW = 16 nm; für Rot Bandfilter des Typs PAL, e) λ_{max} = 651 nm, HW = 22 nm; f) λ_{max} = 652 nm, HW = 21 nm benutzt.

Angestrebt waren ursprünglich die Wellenlängen 460 nm, 530 nm und 650 nm, um das Wrightsche Primärvalenzsystem benutzen zu können (112). Die kleinen Abweichungen in den Wellenlängen wurden vernachlässigt, so daß die Primärvalenzen $\vec{D}(460)$, $\vec{E}(530)$ und $\vec{F}(650)$ und nach der Normierung $\vec{B}(460)$, $\vec{G}(530)$ und $\vec{R}(650)$ genannt wurden (91).

3) WDW-System und spezielle deuteranopische Normierung

Die Primärvalenzen $\vec{D}(460)$, $\vec{E}(530)$ und $\vec{F}(650)$ sind rein apparativ festgelegt und nicht zu irgendwelchen Zwecken normiert, d.h. es sind nur die Richtungen im Farbenraum festgelegt, nicht aber die Einheiten im Sinne einer Längennormierung. Obwohl diese im Prinzip frei wählbar ist, bietet das WDW-System nach Wright (112) den Vorteil der besseren Vergleichbarkeit. Dabei wird die gelbe Spektralfarbvalenz von 583 nm durch die Primärvalenzen $\vec{E}(530)$ und $\vec{F}(650)$ und eine blaugrüne Spektral-

farbvalenz von 494 nm durch die Primärvalenzen $\vec{D}$ (460) und $\vec{E}$ (530) nachgemischt. Es werden zwei Quotienten gebildet: $\frac{E}{D}_{(494)}$ wird multipliziert mit D; $\frac{E}{F}_{(583)}$ wird multipliziert mit F.

Pitt (62) und Wright (112) schreiben, daß bei einer solchen 1:1 Normierung der roten zur grünen Primärvalenz die deuteranopischen Verwechslungsgeraden nahezu parallel zur Rot-Grünen Dreiecksseite in der Farbtafel laufen und diese einmal oberhalb der grünen, das andere Mal unterhalb der roten Primärvalenz schneiden. Es gelingt eine zeichnerisch einfachere Darstellung der deuteranopischen Fehlpunkte, wenn man die Gewichtung von roter zu grüner Primärvalenz anders vornimmt. Da grundsätzlich Freiheit in der Normierung besteht, wurde die von Scheibner vorgeschlagene Normierung $\frac{R(583)}{G(583)} = 0{,}4$ verwendet (88, 91).

4) Kalibrierung des Dreifarbenmeßgerätes - Umrechnung ins Normalvalenzsystem

Die Kalibrierung erfolgte mit Hilfe dreier Farbarten und einer Farbvalenz, die im Prinzip beliebig wählbar ist. Diese Farbvalenz war durch ein Filter VG 12 der Dicke 2 mm gegeben.
Für die instrumentellen Primärvalenzen ergaben sich folgende Beziehungen aus den Tabellen für Normspektralwerte (44, S. 201ff.; 113, S. 240ff.):

$\vec{B}(460) = 0{,}2908 \cdot \vec{X} + 0{,}06 \cdot \vec{Y} + 1{,}6692 \cdot \vec{Z}$

$\vec{G}(531) = 0{,}177257 \cdot \vec{X} + 0{,}9738108 \cdot \vec{Y} + 0{,}03950728 \cdot \vec{Z}$

$\vec{R}(650) = 0{,}2835 \cdot \vec{X} + 0{,}107 \cdot \vec{Y} + 0$

Damit lägen die Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$, $\vec{R}$ fest.
Da sie aber nur der Farbart nach festgelegt sein sollen, werden Zahlen k, l, m eingeführt. Sie sollen verdeutlichen, daß die Farbtafel im Sinne einer Normierung der Primärvalenzen noch nicht festliegt. k, l, m sind also noch zu bestimmende Konstanten. Das führt auf das Gleichungssystem:

$$
(1) \qquad \begin{aligned}
\vec{B} &= k \cdot 0{,}2908 \cdot \vec{X} + k \cdot 0{,}06 \cdot \vec{Y} + k \cdot 1{,}6692 \cdot \vec{Z} \\
\vec{G} &= l \cdot 0{,}17726 \cdot \vec{X} + l \cdot 0{,}87381 \cdot \vec{Y} + l \cdot 0{,}035073 \cdot \vec{Z} \\
\vec{R} &= m \cdot 0{,}2835 \cdot \vec{X} + m \cdot 0{,}107 \cdot \vec{Y} + m \cdot 0
\end{aligned}
$$

Die zugehörige transponierte Transformation zwischen den Farbwerten (s. Abschnitt II, 6) lautet damit:

$$
(2) \qquad \begin{aligned}
X &= k \cdot 0{,}2908 \cdot B + l \cdot 0{,}17726\ G + m \cdot 0{,}2835\ R \\
Y &= k \cdot 0{,}06\ B \cdot + l \cdot 0{,}87381 \cdot G + m \cdot 0{,}107\ R \\
Z &= k \cdot 1{,}6692 \cdot B + l \cdot 0{,}03951 \cdot G + 0
\end{aligned}
$$

Am Dreifarbenmeßgerät ergaben sich beim Abgleich für das Filter VG 12 durch einen Trichromaten folgende Werte:

H = Helligkeit $\qquad H = 33{,}3$

$\vec{C}(\text{VG } 12) = 38{,}4 \cdot \vec{D} + 45 \cdot \vec{E} + 10{,}0 \cdot \vec{F}$

Mit der Trendelenburg-Gleichung (PIL = 494 nm) und der Rayleigh-Gleichung (PIL = 494 nm) erfolgt die Normierung

für die Transformation ins WDW-System (s. Abschnitt IV,3). Die Daten der Normierungsfarbabgleiche sind die eines Trichromaten.

$$\vec{C}(583) = 0 \cdot \vec{D} + 11 \cdot \vec{E} + 11{,}5 \cdot \vec{F}$$

Es wird festgelegt:

$$\frac{R(583)}{G(583)} = 0{,}4$$

$$R = \frac{0{,}4 \cdot 11}{11{,}5} \cdot F$$

$$R = 0{,}3826 \cdot F$$

In der folgenden Tendelenburg-Gleichung steht w für Entsättigung, d.h. der Farbabgleich gelang nur im Sinne der äußeren Farbmischung:

$$\vec{C}(494) + \vec{W} = 5 \cdot \vec{D} + 4 \cdot \vec{E} + 0 \cdot \vec{F}$$

Es wird festgelegt:

$$\frac{B(494)}{G(494)} = 1$$

$$B = \frac{1 \cdot 4}{5} \cdot D = 0{,}8 \cdot D$$

Damit lautet die ins WDW-System transformierte Farbvalenz VG 12:

(3) $$\vec{C}(VG\ 12) = 30{,}72 \cdot \vec{B} + 45 \cdot \vec{G} + 3{,}826 \cdot \vec{R} \quad (H = 33{,}3)$$

Umgerechnet auf H = 100 lautet die Gleichung:

$$\vec{C}(VG\ 12) = 92{,}25 \cdot \vec{B} + 135{,}13 \cdot \vec{G} + 11{,}489 \cdot \vec{R}$$

Dieser Farbvalenz von VG 12 wird die zugehörige Normfarbvalenz, bezogen auf die benutzte Strahlungsverteilung der Lampe im Dreifarbenmeßgerät von 3000 K zugeordnet (113, S. 47)

$$(4) \qquad \vec{C}(VG\ 12) = 13{,}358 \cdot \vec{X} + 22{,}836 \cdot \vec{Y} + 16{,}052 \cdot \vec{Z}$$

Einsetzen der Farbwerte aus (3) und (4) in das Gleichungssystem (2) ergibt für die Konstanten k, l, m die Gleichungen:

$$\begin{aligned} 13{,}358 &= k \cdot 0{,}2908 \cdot 92{,}25 + l \cdot 0{,}06 \cdot 135{,}13 + m \cdot 0{,}2835 \cdot 11{,}489 \\ 22{,}836 &= k \cdot 0{,}06 \cdot 92{,}25 + l \cdot 0{,}87381 \cdot 135{,}13 + m \cdot 0{,}107 \cdot 11{,}489 \\ 16{,}052 &= k \cdot 1{,}6692 \cdot 92{,}25 + l \cdot 0{,}03951 \cdot 135{,}13 \end{aligned} \qquad (5)$$

Die Auflösung des Gleichungssystems (5) nach k, l und m ergibt:

$k = 0{,}09844$

$l = 0{,}16734$

$m = 2{,}05976$

Diese Werte, eingesetzt in Gleichungssystem (2), ergeben die gesuchte Gleichung:

$$\begin{aligned} X &= 0{,}02863 \cdot B + 0{,}02966 \cdot G + 0{,}58394 \cdot R \\ Y &= 0{,}00591 \cdot B + 0{,}14622 \cdot G + 0{,}22039 \cdot R \\ Z &= 0{,}16432 \cdot B + 0{,}00661 \cdot G + 0 \end{aligned} \qquad (6)$$

Mit der zu (6) kontragredienten Matrix werden die Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$, $\vec{R}$ und die Leuchtdichtebeiwerte ß, γ, ρ ins CIE-System transformiert (24, S. 99 ff.; 45, S. 391 ff.):

$$
\begin{aligned}
\vec{X} &= 0{,}11229 \cdot \vec{B} - 0{,}29753 \cdot \vec{G} + 0{,}07677 \cdot \vec{R} \\
\vec{Y} &= -2{,}79111 \cdot \vec{B} + 7{,}39513 \cdot \vec{G} + 0{,}22043 \cdot \vec{R} \\
\vec{Z} &= 1{,}84877 \cdot \vec{B} - 0{,}36106 \cdot \vec{G} - 0{,}30911 \cdot \vec{R}
\end{aligned}
\qquad (7)
$$

Im folgenden wurde für jede Versuchsperson für den Wechsel des Bezugssystems (s. Abschnitt II,9) eine individuelle Matrix berechnet, indem die Farbvalenz — repräsentiert durch das Filter VG 12 — mit eigener Trendelenburg-Gleichung normiert wurde.
Die individuellen Transformationsgleichungen sollen im folgenden aufgestellt werden.

C. Sch., Deuteranop

k = 0,1575

l = 0,1673

m = 2,0603

$$
\begin{pmatrix} \vec{B} \\ \vec{G} \\ \vec{R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}0458 & 0{,}0296 & 0{,}5839 \\ 0{,}0094 & 0{,}1462 & 0{,}2203 \\ 0{,}2631 & 0{,}0066 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{pmatrix}
$$

$$
\begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}0701 & -0{,}1857 & 3{,}7942 \\ -2{,}7911 & 7{,}3951 & 0{,}2204 \\ 1{,}8487 & -0{,}3610 & -0{,}3091 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{B} \\ \vec{G} \\ \vec{R} \end{pmatrix}
$$

P. V., Deuteranop

k = 0,0945

l = 0,1673

m = 2,0597

$$\begin{pmatrix} \vec{B} \\ \vec{G} \\ \vec{R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,0275 & 0,0296 & 0,5839 \\ 0,0056 & 0,1462 & 0,2203 \\ 0,1979 & 0,0066 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,1168 & -0,3096 & 6,3237 \\ -2,7911 & 7,3951 & 0,2204 \\ 1,8487 & -0,3610 & -0,3091 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{B} \\ \vec{G} \\ \vec{R} \end{pmatrix}$$

J. M., Deuteranop

k = 0,1359

l = 0,1673

m = 2,0597

$$\begin{pmatrix} \vec{B} \\ \vec{G} \\ \vec{R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,0395 & 0,0296 & 0,5839 \\ 0,0081 & 0,1462 & 0,2203 \\ 0,2269 & 0,0066 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,0812 & -0,2153 & 4,3991 \\ -2,7911 & 7,3951 & 0,2204 \\ 1,8487 & -0,3610 & -0,3091 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{B} \\ \vec{G} \\ \vec{R} \end{pmatrix}$$

R. Sch., Deuteranop

k = 0,0977

l = 0,1673

m = 2,0597

$$\begin{pmatrix} \vec{B} \\ \vec{G} \\ \vec{R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,0284 & 0,0296 & 0,5839 \\ 0,0058 & 0,1462 & 0,2203 \\ 0,1631 & 0,0066 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,1130 & -0,2996 & 6,1197 \\ -2,7911 & 7,3951 & 0,2204 \\ 1,8487 & -0,3610 & -0,3091 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{B} \\ \vec{G} \\ \vec{R} \end{pmatrix}$$

U. W., Deuteranop

k = 0,0985

l = 0,1673

m = 2,0597

$$\begin{pmatrix} \vec{B} \\ \vec{G} \\ \vec{R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,0286 & 0,0296 & 0,5839 \\ 0,0059 & 0,1462 & 0,2203 \\ 0,1644 & 0,0066 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,1121 & -0,2972 & 6,0708 \\ -2,7911 & 7,3951 & 0,2204 \\ 1,8487 & -0,3610 & -0,3091 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{B} \\ \vec{G} \\ \vec{R} \end{pmatrix}$$

H. St., Deuteranop

k = 0,0985

l = 0,1673

m = 2,0597

$$\begin{pmatrix} \vec{B} \\ \vec{G} \\ \vec{R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,0286 & 0,0296 & 0,5839 \\ 0,0059 & 0,1462 & 0,2203 \\ 0,1644 & 0,0066 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,1121 & -0,2972 & 6,0708 \\ -2,7911 & 7,3951 & 0,2204 \\ 1,8487 & -0,3610 & -0,3091 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{B} \\ \vec{G} \\ \vec{R} \end{pmatrix}$$

V. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

1) Fehlfarben

Für jede Versuchsperson wurden zwischen zehn und fünfzehn Verwechslungsgeraden, auch "isochromatische Linien" genannt, bestimmt. Jeder Verwechslungsgeraden lag ein Ausgangsfarbreiz zugrunde, der zunächst vom Trichromaten nachgemischt wurde (s. Abb. 4 - 13, dargestellt durch offene Kreise). Dieser Ausgangsfarbreiz —in der linken Gesichtsfeldhälfte des Dreifarbenmeßgerätes angeboten— setzte sich zusammen aus einer Überlagerung der Strahlengänge vom Interferenzverlaufsfilter bei 452 nm und des Farbfilters OG 530. Alle Ausgangsreize lagen auf einer Geraden, die die beiden Farbörter miteinander verbindet.
Der Abgleich des Trichromaten wurde von allen Deuteranopen anerkannt, nicht jedoch von der deuteranomalen Versuchsperson H. St.. Die Farbwerte dieser Abgleiche gingen als gemeinsamer Subtrahend in die Auswertung ein.
Nun wurde der Abgleich durch Verändern des Rotanteiles in der rechten Photometerfeld-Hälfte zerstört und der Deuteranop aufgefordert, nur durch Verändern des Grünanteiles wieder vollständige Farbgleichheit herzustellen.
Das gelang allen Deuteranopen. Mit der Einstellung auf gleiche Helligkeit entstand für sie wieder vollständige Farbgleichheit.
Bei der deuteranomalen Versuchsperson H. St. gelang dies nicht, er konnte durch reine Helligkeitskorrektur keine

Farbgleichheit erzielen. Er bekam die Aufgabe, die beiden Photometerhälften, obwohl verschieden farbig, gleich hell abzugleichen. Durch Adaptationsmechanismen gelang es, zumindest in einem bestimmten Bereich der Farbtafel, innerhalb von 15 Sekunden auch Farbgleichheit zu erzielen.

So ergaben sich für eine trichromatische Ausgangsfarbvalenz mehrere Repräsentanten e i n e r dichromatischen Farbvalenz. Diese trichromatischen Repräsentanten waren für den Deuteranopen - im Gegensatz zu einem Trichromaten - ununterscheidbar.

Die durch wiederholten Abgleich ermittelte dichromatische Farbvalenz lautete in ihren trichromatischen Repräsentanten:

$$\vec{C}_i = B_i \cdot \vec{B} + G_i \cdot \vec{G} + R_i \cdot \vec{R} \quad / \quad i = 1, 2, 3 \ldots n$$

Die Differenz zwischen dem einen trichromatischen Repräsentanten (mit den Farbwerten B_o, G_o, R_o) und den übrigen trichromatischen Repräsentanten (mit den Farbwerten B_i, G_i R_i) ergaben die zu einer Verwechslungsgeraden gehörigen Fehlfarben (s. II,4).

2) Alychnen

Eine Alychne, als Ebene im dreidimensionalen Farbenraum, wird bestimmt durch zwei Vektoren, die Fehlfarbe und einen Quervektor, die zueinander nicht parallel sein dürfen (s. II, 6). Die Alychnenbestimmung ist im Prinzip eine Isolychnenbestimmung und beruht auf heterochromen Helligkeitsabgleichen, bei denen die beiden Photometerhälften auch für den Deuteranopen verschieden farbig sind.

Praktisch wurde folgendermaßen vorgegangen:
Gegeben war eine Farbvalenz mit den Farbwerten B_1, G_1, R_1 auf der rechten Photometerhälfte. Die Farbvalenz auf der linken Photometerhälfte unterschied sich auch für den Deuteranopen deutlich von der der rechten Hälfte.
Die Versuchsperson erhielt nun den Auftrag, die beiden Gesichtsfeldhälften helligkeitsmäßig zu vergleichen, und sich von großen Helligkeitsunterschieden auf einen minimalen Helligkeitsunterschied einzupendeln (58).
Die links eingestellte Helligkeit H_{het} am Brodhun-Sektor (BSM in Abb. 3) wurde notiert. Dann mischte die Versuchsperson die linke Farbvalenz rechts nach, so daß vollständige Farbgleichheit, also sowohl nach Farbton als auch nach Helligkeit, bestand. Die neuen Farbwerte B_2, G_2, R_2 und die neue "isochrome" Helligkeit (H_{iso}) wurden notiert.
Es galt also folgende Beziehung (s. Abb. 2):

$$\vec{a}_1 = B_1 \cdot \vec{B} + G_1 \cdot \vec{G} + R_1 \cdot \vec{R} \overset{het}{=} B_2 \cdot \vec{B} + G_2 \cdot \vec{G} + R_2 \cdot \vec{R} = \vec{a}_3$$

Sowohl für die heterochromen wie für die isochromen Helligkeitsabgleiche wurden die Messungen sechsmal durchgeführt und anschließend der Mittelwert gebildet (58). Der Quervektor entstand durch Differenzbildung zwischen den Farbvalenzen $\vec{a}_1$ und $\vec{a}_3$. Der Farbort des mittleren Quervektors wurde durch Mittelung über alle Quervektoren bestimmt (s. Abb. 4 - 13). Eine Richtungsmittelung durch Normierung auf G = 1 erschien in diesem Fall — im Gegensatz zur Fehlfarbe — nicht sinnvoll, da der Quervektor innerhalb der Isolychne vollkommene Bewegungsfreiheit hat. Deshalb wurde

der mittlere Quervektor als Schlußlinie bestimmt (58).

3) Neutrale Zone

Die Bestimmung der neutralen Zone erfolgte mit Hilfe des in der Wellenlänge kalibrierten Interferenzverlaufsfilters (s. Abb. 3, IF). Die Versuchspersonen durften die Wellenlänge variieren und sollten dabei auf das Verschwinden des Blautones achten. Als Äquivalent einer neutralen Zone wurde beim Deuteranomalen die Stelle höchstmöglicher Entsättigung bestimmt.

VI. ERGEBNISSE

1) Fehlfarben der Deuteranopen

a) WDW-System

Jeder Versuchsperson wurden als Ausgangsreize zwischen 10 und 15 Farben vorgegeben. Jeder wurde vier- bis siebenmal verschieden abgeglichen. Für jede Verwechslungsgerade wurde ein mittlerer Fehlpunkt als Farbort der Fehlfarbe bestimmt. Die Abbildungen 4 - 8 zeigen die Darstellung der Verwechslungsgeraden in der Farbtafel des WDW-Systems. Die offenen Kreise markieren die Ausgangsreize für die Fehlfarbenbestimmung. Die Verwechslungsgeraden sind von Gelb zu Blau fortlaufend numeriert.

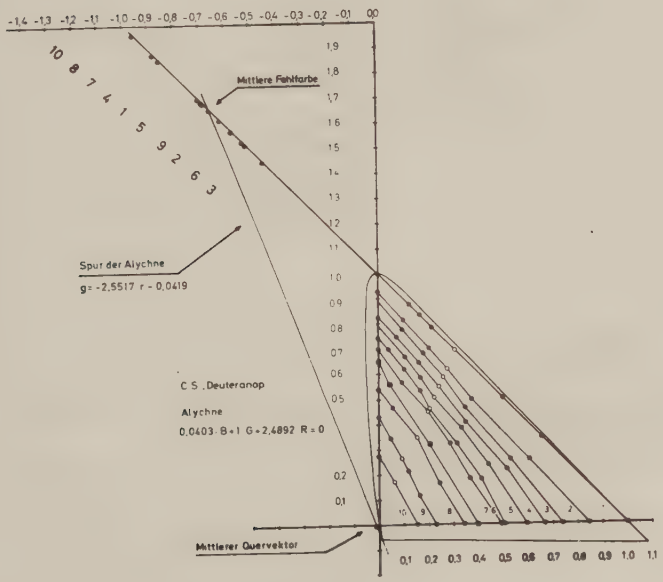


Abb. 4: Ergebnisse der Fehlfarbenbestimmung für die Versuchsperson C. S. im WDW-System.

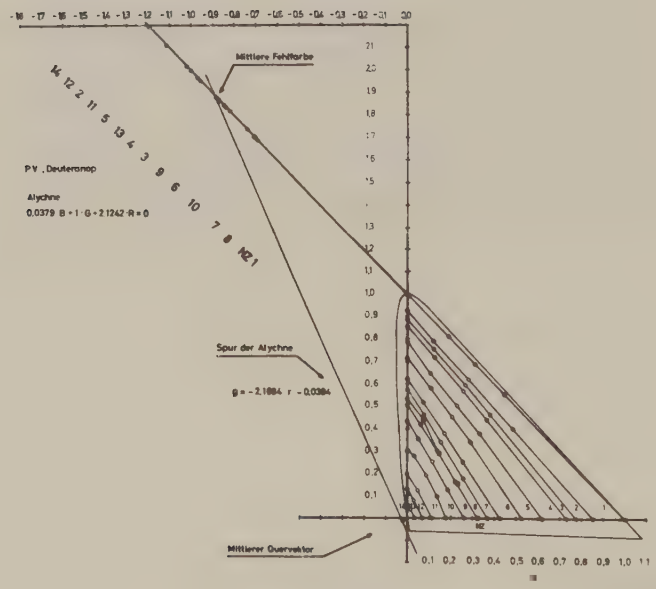


Abb. 5: Ergebnisse der Fehlfarbenbestimmung für die Versuchsperson P. V. im WDW-System.

Die Meßpunkte für die Verwechslungsgerade der neutralen Zone (NZ) sind in allen Abbildungen durch Quadrate markiert. Auf eine Darstellung des zugehörigen Fehlpunktes wurde mit Ausnahme der Versuchsperson P. V. in Abb. 5 verzichtet.

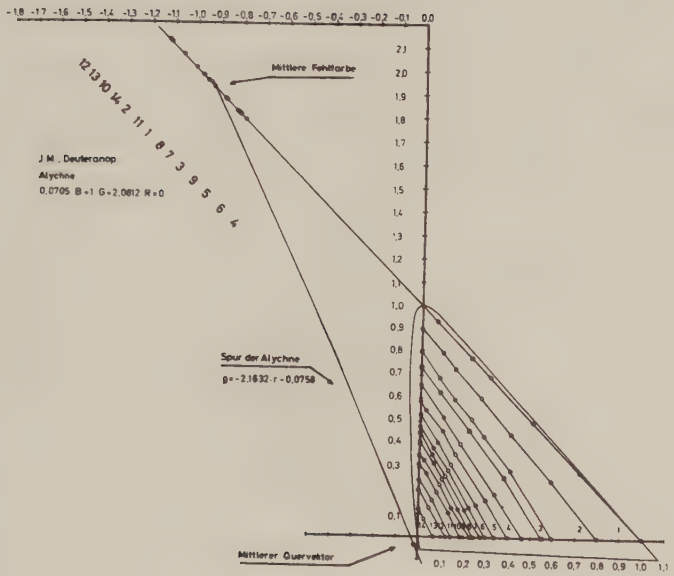


Abb. 6: Ergebnisse der Fehlfarbenbestimmung für die Versuchsperson J. M. im WDW-System.

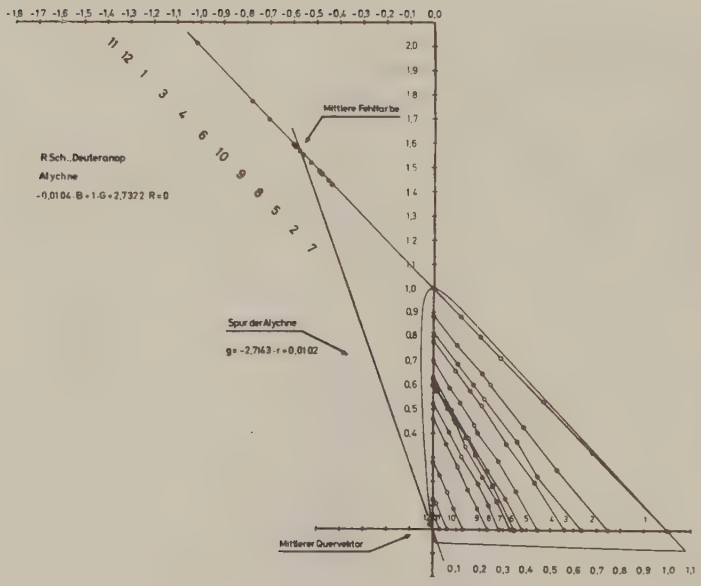


Abb. 7: Ergebnisse der Fehlfarbenbestimmung für die Versuchsperson R. Sch. im WDW-System.

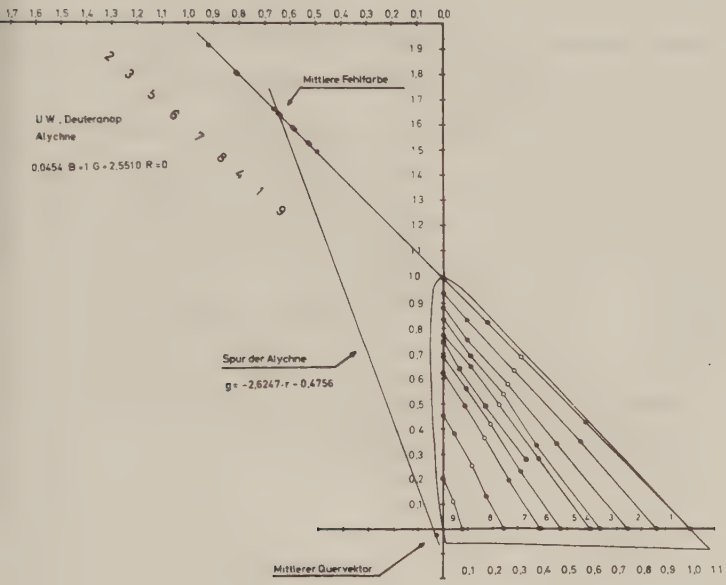


Abb. 8: Ergebnisse der Fehlfarbenbestimmung für die Versuchsperson U. W. im WDW-System.

b) CIE-System

Auf den Abbildungen 9 - 13 sind die gleichen Ergebnisse im CIE-System dargestellt. Die entsprechenden Transformationsmatrizen sind in Abschnitt IV, 3 angegeben.

In den CIE-Farbtafeln ist die Abszisse identisch mit der trichromatischen Alychnenspur (66, S. 75). Damit wird die Abweichung der deuteranopischen Alychnenspur von der trichromatischen offensichtlich.

Die Ausgangsreize sind wieder mit offenen Kreisen gekennzeichnet, die Neutrale Zone mit Quadraten. Der über alle Verwechslungsgeraden gemittelte Fehlpunkt ist mit einem offenen Kreis gekennzeichnet.

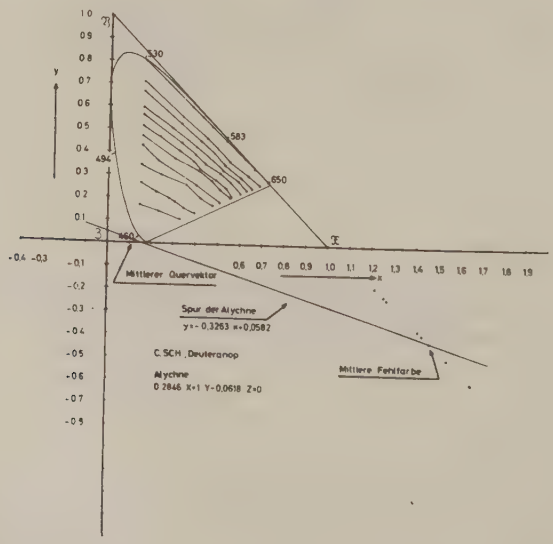


Abb. 9: Verwechslungsgeraden und Fehlpunkte der deuteranopischen Versuchsperson C. Sch. im System des farbmetrischen Normalbeobachters CIE 1931.

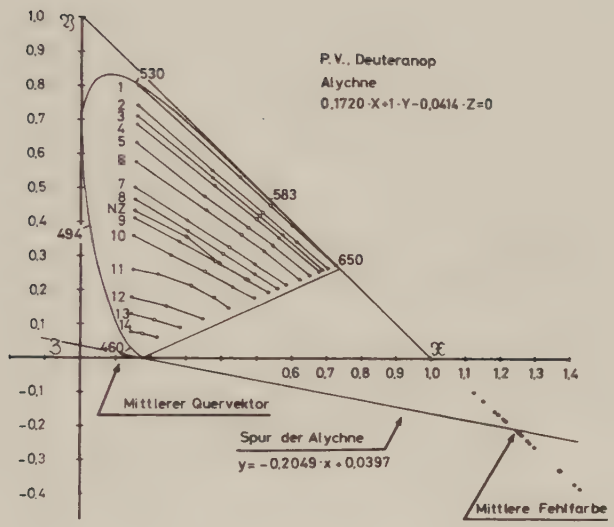


Abb. 10: Ergebnisse der Fehlfarbenbestimmung für die Versuchsperson P. V. im CIE-System.

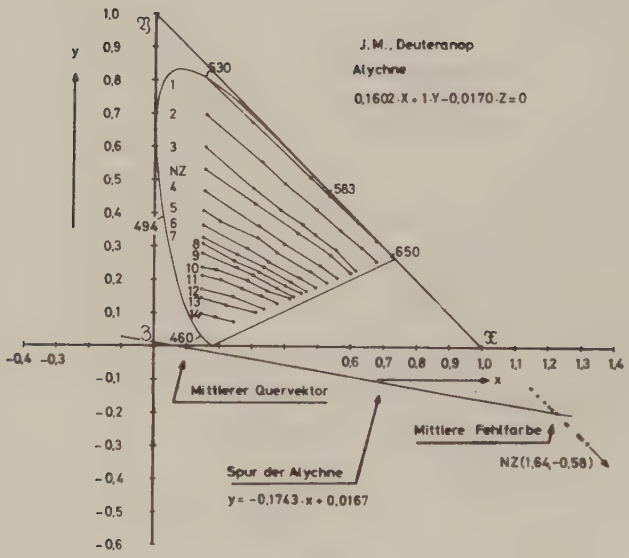


Abb. 11: Ergebnisse der Fehlfarbenbestimmung für die Versuchsperson J. M. im CIE-System.

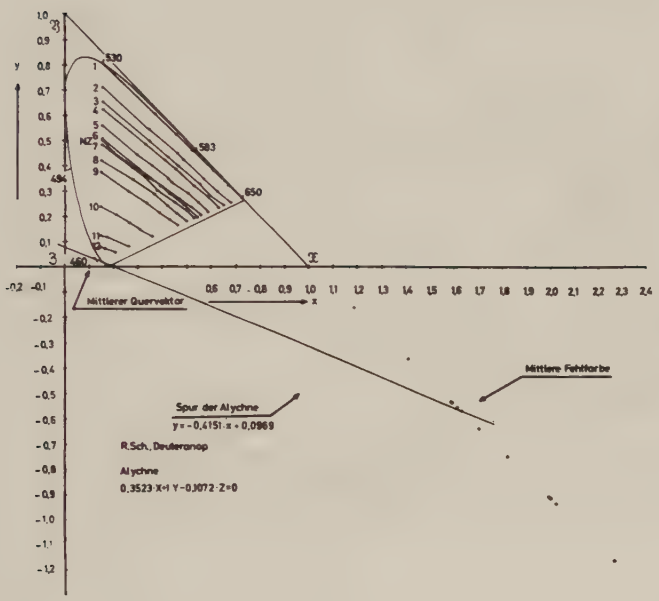


Abb. 12: Ergebnisse der Fehlfarbenbestimmung für die Versuchsperson R. Sch. im CIE-System.

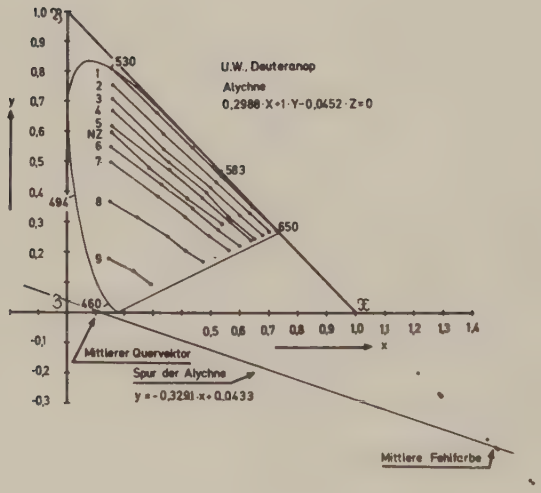


Abb. 13: Ergebnisse der Fehlfarbenbestimmung für die Versuchsperson U. W. im CIE-System.

Tab. 1 zeigt die Farbwerte B_F, G_F und R_F der mittleren Fehlfarben im BGR-System für die fünf deuteranopischen Versuchspersonen. Der grüne Farbwert G_F wurde willkürlich auf 1 normiert.

Tabelle 1

VP	B_F	G_F	R_F
C. Sch.	0,0	1	-0,4017
P. V.	0,0	1	-0,4707
J. M.	0,0	1	-0,4805
R. Sch.	0,0	1	-0,3660
U. W.	0,0	1	-0,3920

Tab. 2 zeigt die Farbörter der Fehlfarben in der Farbtafel des WDW-Systems, also die Farbwertanteile g und r der Fehlpunkte.

Tabelle 2

VP	g_F	r_F
C. Sch.	1,6714	-0,6714
P. V.	1,8895	-0,8895
J. M.	1,9249	-0,9249
R. Sch.	1,5772	-0,5772
U. W.	1,6447	-0,6447

Tab. 3 gibt die zu Tab. 2 gehörigen Normfarbwertanteile im System des Farbmetrischen Normalbeobachter CIE 1931 an, wobei die Transformation mit einer für jede Versuchsperson individuellen Matrix erfolgte. Da die Fehlpunkte im CIE-System nicht auf der Verlängerung der Dreiecksseite $\vec{X} - \vec{Y}$ liegen, ist der Farbwertanteil für z von Null verschieden.

Tabelle 3

VP	x_F	y_F	z_F
C. Sch.	1,4683	-0,4207	-0,0476
P. V.	1,2499	-0,2165	-0,0334
J. M.	1,2301	-0,1976	-0,0325
R. Sch.	1,6449	-0,5859	-0,0590
U. W.	1,5005	-0,4505	-0,0500

2) Reduktion der Trichromasie auf die Deuteranopie

Das Ergebnis der Reduktion der Deuteranopie aus der Trichromasie sind dichromatische Spektralwertkurven $\bar{k}(\lambda)$ und $\bar{w}(\lambda)$. Die Reduktion wurde zunächst für die Farbwerte durchgeführt und dann auf Spektralwerte angewendet.

Tab. 4 zeigt die Ergebnisse der Reduktion für die fünf deuteranopischen Versuchspersonen.

Tabelle 4

1. C. Sch.	$\bar{k}(\lambda) = \bar{b}(\lambda)$ $\bar{w}(\lambda) = 0{,}4017 \cdot \bar{g}(\lambda) + \bar{r}(\lambda)$
2. P. V.	$\bar{k}(\lambda) = \bar{b}(\lambda)$ $\bar{w}(\lambda) = 0{,}4707 \cdot \bar{g}(\lambda) + \bar{r}(\lambda)$
3. J. M.	$\bar{k}(\lambda) = \bar{b}(\lambda)$ $\bar{w}(\lambda) = 0{,}4805 \cdot \bar{g}(\lambda) + \bar{r}(\lambda)$
4. R. Sch.	$\bar{k}(\lambda) = \bar{b}(\lambda)$ $\bar{w}(\lambda) = 0{,}3660 \cdot \bar{g}(\lambda) + \bar{r}(\lambda)$
5. U. W.	$\bar{k}(\lambda) = \bar{b}(\lambda)$ $\bar{w}(\lambda) = 0{,}3920 \cdot \bar{g}(\lambda) + \bar{r}(\lambda)$

In Abb. 14 wird am Beispiel der deuteranopischen Versuchsperson J. M. die Reduktion der drei trichromatischen Spektralwertkurven $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{r}(\lambda)$ auf zwei deuteranopische Spektralwertkurven mit $\bar{k}(\lambda)$ und $\bar{w}(\lambda)$ graphisch dargestellt. Das Maximum der Kurve $\bar{w}(\lambda)$ liegt bei 561 nm, das für $\bar{k}(\lambda)$ bei 446 nm.

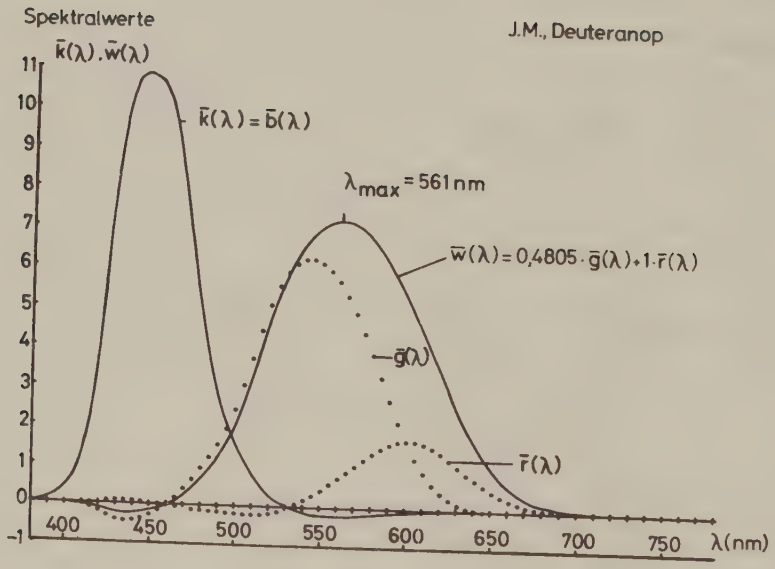


Abb. 14: Trichromatische Spektralwertkurven $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{r}(\lambda)$ und reduzierte dichromatische Spektralwertkurven $\bar{k}(\lambda)$ und $\bar{w}(\lambda)$ für die deuteranopische Versuchsperson J. M..

Die trichromatischen Spektralwertkurven $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{r}(\lambda)$ sind die des farbmetrischen Normalbeobachters CIE 1931 (113). Sie liegen allen Reduktionen zugrunde. Die Transformation dieser Kurven erfolgte mit einer für jede Versuchsperson individuellen Matrix. Das Maximum der langwelligen deuteranopischen Spektralwertkurve $\bar{w}(\lambda)$ wurde für alle deuteranopischen Versuchspersonen bestimmt.

Tab. 5 zeigt das λ_{max} von $\bar{w}(\lambda)$ für die fünf deuteranopischen Versuchspersonen.

Tabelle 5

VP	λ_{max} von $\bar{w}(\lambda)$
C. Sch.	566 nm
P. V.	562 nm
J. M.	561 nm
R. Sch.	569 nm
U. W	567 nm

3) Deuteranopische Primärvalenzen

Abschnitt V, 3 beschreibt die Bestimmung deuteranopischer Primärvalenzen für den allgemeinen Fall. Dazu wurde die Reduktion eines dreidimensionalen Farbenraumes auf einen zweidimensionalen, dichromatischen Farbenraum, die zunächst für Farbwerte durchgeführt wurde, auf Primärvalenzen ausgedehnt.

Im folgenden soll die Rechnung am Beispiel der deuteranopischen Versuchsperson C. Sch. durchgeführt werden.
Die dreireihige Matrix wird bestimmt durch die deuteranopischen Farbwerte K und W, erweitert durch den Kern der homomorphen Abbildung eines dreidimensionalen Farbenraumes auf einen zweidimensionalen; das ist die Fehlfarbe D.
K und W wurden berechnet (II, 3), die Fehlfarbe wurde gemessen (V, 1); daraus folgt:

$$
\begin{aligned}
K &= 1 \cdot B \\
W &= 0{,}4017 \cdot G + 1 \cdot R \\
D &= 1 \cdot G - 0{,}4017 \cdot R
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

In Matrixschreibweise:

$$
\begin{pmatrix} K \\ W \\ D \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} B \\ G \\ R \end{pmatrix}
$$

wobei

$$
M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}4017 & 1 \\ 0 & 1 & -0{,}4017 \end{pmatrix}
$$

Durch Transposition und Inversion der Matrix M ergibt sich:

$$
\begin{aligned}
\vec{K} &= 1 \cdot \vec{B} \\
\vec{W} &= 0{,}3459 \cdot \vec{G} + 0{,}8611 \cdot \vec{R} \\
\vec{D} &= 0{,}8611 \cdot \vec{G} - 0{,}3459 \cdot \vec{R}
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

In Matrixschreibweise:

$$\begin{pmatrix} \vec{K} \\ \vec{W} \\ \vec{D} \end{pmatrix} = M^{T(-1)} \begin{pmatrix} \vec{B} \\ \vec{G} \\ \vec{R} \end{pmatrix}$$

wobei $$M^{T(-1)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}3459 & 0{,}8911 \\ 0 & 0{,}8611 & -0{,}3459 \end{pmatrix}$$

$\vec{K}$, $\vec{W}$ und $\vec{D}$ sind die gesuchten deuteranopischen Primärvalenzen. Der Übergang zu Farbwertanteilen führt zu den Farbörtern der deuteranopischen Primärvalenzen in der trichromatischen Farbtafel.

für $\vec{K}$: $g = 0$, $r = 0$

für $\vec{W}$: $g = 0{,}2866$, $r = 0{,}7134$

für $\vec{D}$: $g = 1{,}6714$, $r = -0{,}6714$

Die Farbörter für $\vec{K}$, $\vec{W}$ und $\vec{D}$ ergeben nun ein trichromatisches System. Dieses reduziert sich auf ein dichromatisches, gegeben durch $\vec{K}$ und $\vec{W}$, indem die Fehlfarbe $\vec{D}$ einfach wegfällt.

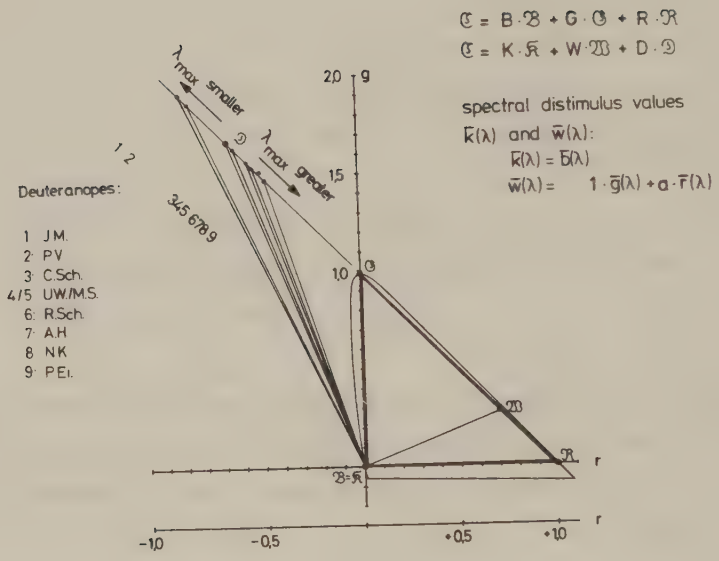


Abb. 15: Sie zeigt ein durch $\vec{D}$ ergänztes dichromatisches System ($\vec{K}$, $\vec{W}$), eingebettet in die trichromatische Farbtafel mit $\vec{B}$, $\vec{G}$ und $\vec{R}$. $\vec{D}$ ist die deuteranopische Fehlfarbe, hier sind die Farbörter der mittleren Fehlfarbe der deuteranopischen Versuchspersonen von Scheibner (91) und Kröger aufgetragen. Der Farbort der Fehlfarbe für das berechnete Beispiel (Nr. 3, C.Sch. bzw. C.S.), ist als dickerer Kreis markiert. Wie die vorausgehende Rechnung zeigt, ist der Farbort von $\vec{K}$ identisch mit demjenigen von $\vec{B}$. Der Farbort der deuteranopischen Primärvalenz $\vec{W}$ liegt auf der rot-grünen Dreiecksseite.

Betrachtet man in Abbildung 15 das Farbdreieck $\vec{K}$, $\vec{W}$, $\vec{D}$, so ist die Spektralwertfunktion $\bar{w}(\lambda)$ bestimmt durch die Gerade durch $\vec{K}$ und $\vec{D}$, da eine Spektralwertfunktion durch die gegenüberliegende Dreiecksseite bestimmt wird (49). Die $\vec{K}$ und $\vec{W}$ verbindende Gerade ist die deuteranopische Farbtafel.
Abb. 15 zeigt weiterhin, wie sich die $\vec{K}$ und $\vec{D}$ verbindende Gerade mit der Lage des deuteranopischen Fehlpunktes ändert. Variationen dieser Gerade bedeuten eine Änderung der deuteranopischen Spektralwertkurve $\bar{w}(\lambda)$.
Es ist in Abbildung 15 gezeigt, wie sich das Maximum der $\bar{w}(\lambda)$-Kurven mit der Lage der Fehlfarben ändert (42).

4) Alychnen und Reduktion auf eine Quasimonochromasie

Für die Alychnenbestimmung ist neben der Fehlfarbe die Bestimmung eines Quervektors notwendig (s. V, 2). Entsprechend der Anzahl von Verwechslungsgeraden wurden bis zu vierzehn Quervektoren bestimmt. Der Farbort der mittleren Quervektoren ist in den Abbildungen 4 - 13 eingetragen. Die Gerade, die geometrisch durch den Farbort der mittleren Fehlfarbe und den Farbort des mittleren Quervektors bestimmt wird, ist als Alychnenspur dieser mittleren Alychne ebenfalls in den Abbildungen 4 - 13 dargestellt.
Aus jedem Quervektor und dem Mittel der benachbarten Fehlfarben wurde lokal eine Alychne berechnet. Die Alychnen wur-

den von gelb nach blau fortlaufend numeriert und die dazugehörigen Leuchtdichtebeiwerte ß, γ und ρ in den Abbildungen 16 - 19 graphisch aufgetragen.
Die Leuchtdichtebeiwerte ergeben sich direkt aus der Abneyschen Gleichung (II, 6), für die die spezielle Raleigh-Normierung gilt (IV, 3).
Tab. 6 zeigt für die fünf deuteranopischen Versuchspersonen die Farbwerte der gemittelten Quervektoren.

Tabelle 6

VP	B_Q	G_Q	R_Q
C. Sch.	26,0256	-0,1252	-0,3708
P. V.	21,1561	-0,1934	-0,1645
J. M.	15,1671	-0,4707	-0,2876
R. Sch.	17,1737	0,5063	-0,1201
U. W.	39,8065	-0,7880	-0,4001

In diesem Fall war eine Normierung auf $G_Q = 1$ nicht erforderlich, da für die Alychnenbestimmung allein die Richtung des Quervektors, nicht jedoch die Länge entscheidend ist.

In Tab. 7 sind die Farbörter der mittleren Quervektoren, die Farbwertanteile g und r des WDW-Systems angegeben.

Tabelle 7

VP	g_Q	r_Q
C. Sch.	-0,0049	-0,0145
P. V.	-0,0093	-0,0079
J. M.	-0,0326	-0,0199
R. Sch.	0,0288	-0,0068
U. W.	-0,0206	-0,0104

Die Farbörter der mittleren Quervektoren liegen in der Nähe der blauen Primärvalenz außerhalb der Farbtafel. Die Farbart der Quervektoren ist also virtuell. Tab. 8 zeigt die Farbörter der Quervektoren in der Farbtafel des Normalbeobachters CIE 1931. Die Transformation wurde mit einer für jede Versuchsperson individuellen Matrix durchgeführt (IV, 3).

Tabelle 8

VP	x_Q	y_Q
C. Sch.	0,1221	0,0183
P. V.	0,1239	0,0143
J. M.	0,1086	-0,0022
R. Sch.	0,0437	0,1278
U. W.	0,1184	0,0042

Tab. 9 gibt für die fünf deuteranopischen Versuchspersonen die mittleren Leuchtdichtebeiwerte im WDW-System an, wobei der grüne Leuchtdichtebeiwert willkürlich auf $\gamma = 1$ normiert ist.

Tabelle 9 WDW-System, $\gamma = 1$

VP	β	γ	ρ
C. Sch.	0,4030	1	2,4892
P. V.	0,0379	1	2,1242
J. M.	0,0705	1	2,0812
R. Sch.	-0,0104	1	2,7322
U. W.	0,0454	1	2,5510

Eine der aufgeführten Versuchspersonen zeigt einen negativen blauen Leuchtdichtebeiwert.

Tab. 10 zeigt die entsprechenden Leuchtdichtebeiwerte im CIE-System. Die Transformation wurde für jede Versuchsperson mit einer individuellen Matrix durchgeführt (IV, 4).

Tabelle 10

VP	ξ	η	ζ
C. Sch.	0,2846	1	-0,0618
P. V.	0,1720	1	-0,0414
J. M.	0,1602	1	-0,0170
R. Sch.	0,3523	1	-0,1072
U. W.	0,2988	1	-0,0452

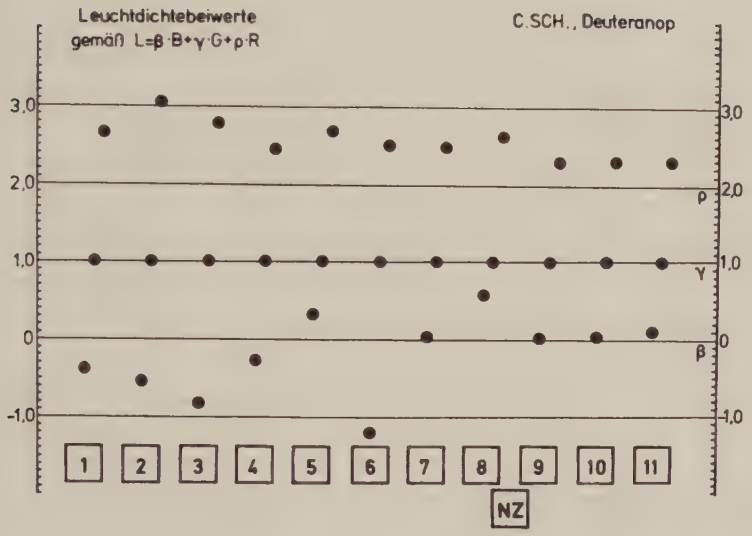


Abb. 16: Leuchtdichtebeiwerte β, γ, ρ für die Versuchsperson C. Sch. gemäß der Abneyschen Gleichung.

Die Abbildungen 16 - 20 stellen die lokal bestimmten Alychnen dar; d.h. für jeden Ausgangsreiz (s. Abb. 4 - 13, offene Kreise) ergeben sich gemäß der Abneyschen Gleichung drei Leuchtdichtebeiwerte β, γ, ρ, wobei $\gamma = 1$ gesetzt wurde. Die Ausgangsreize sind von Gelb nach Blau fortlaufend numeriert.

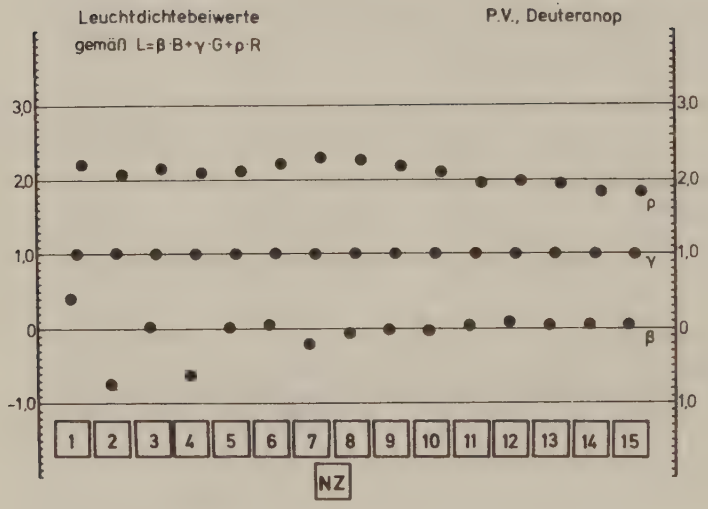


Abb. 17: Leuchtdichtebeiwerte β, γ, ρ für die Versuchsperson P. V. gemäß der Abneyschen Gleichung.

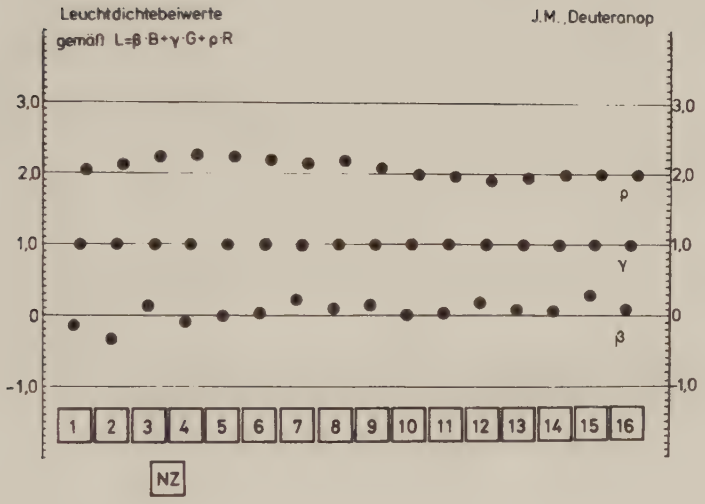


Abb. 18: Leuchtdichtebeiwerte β, γ, ρ für die Versuchsperson J. M. gemäß der Abneyschen Gleichung.

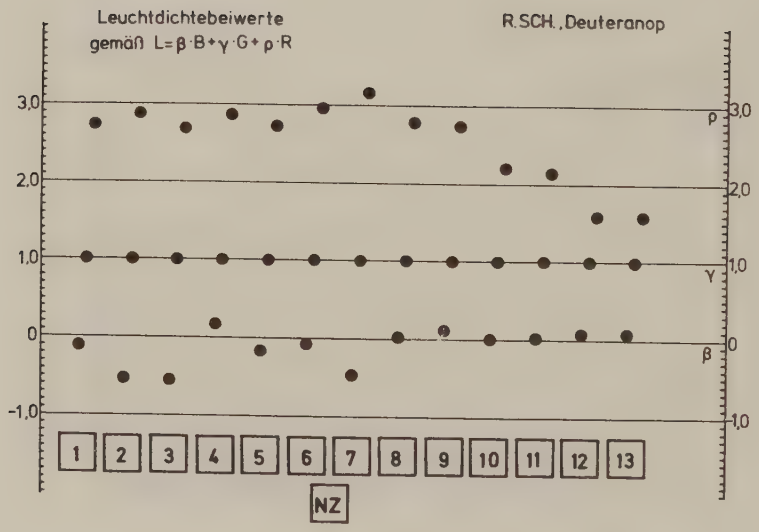


Abb. 19: Leuchtdichtebeiwerte β, γ, ρ für die Versuchsperson R. Sch. gemäß der Abneyschen Gleichung.

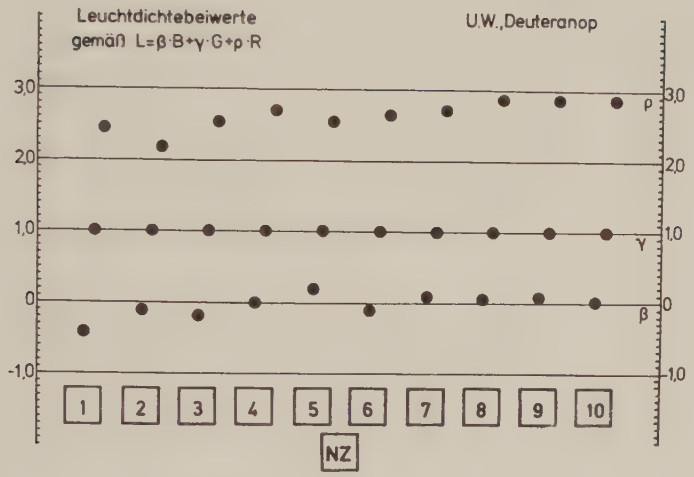


Abb. 20: Leuchtdichtebeiwerte β, γ, ρ für die Versuchsperson U. W. gemäß der Abneyschen Gleichung.

Die Gleichung der Alychne leistet den Übergang von drei trichromatischen Spektralwertkurven, z.B. denen des farbmetrischen Normalbeobachters CIE 1931 $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{r}(\lambda)$ zu der einen spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion $\bar{l}(\lambda)$, die auf Abb. 21 dargestellt ist.

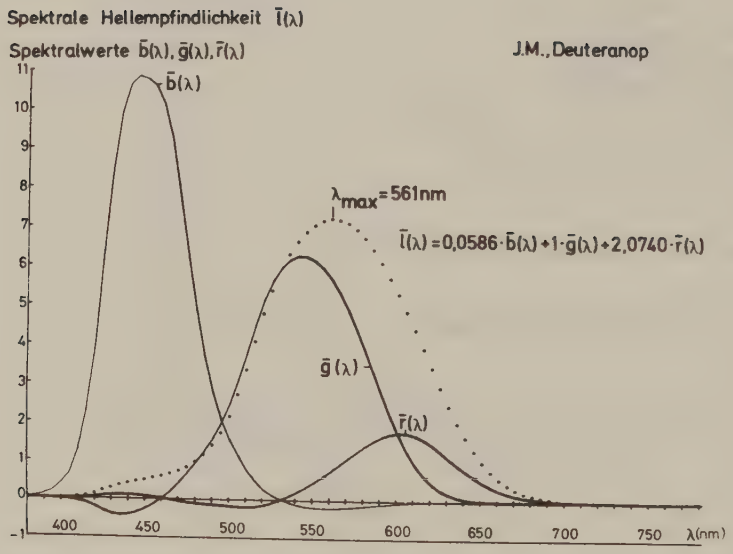


Abb. 21: Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion $\bar{l}(\lambda)$ am Beispiel der deuteranopischen Versuchsperson J. M.

Die Schnittspur der Alychnenebene mit der Einheitsebene B + G + R = 1 stellt sich in den Abbildungen 4 – 13 als Spur der Alychne dar. Sie verbindet stets den Farbort des mittleren Quervektors mit demjenigen der mittleren Fehlfarbe.

In Tab. 11 sind die Gleichungen der Spur der Alychne einmal im WDW-System, das andere Mal im CIE-System aufgezeigt.

Tabelle 11

Schnittspur der Alychne

VP	WDW-System	CIE-System 1931
C. Sch.	g = -2,5517·r - 0,0419	y = -0,3263·x - 0,0582
P. V.	g = -2,0143·r + 0,0556	y = -0,2049·x + 0,0397
J. M.	g = -2,1632·r - 0,0758	y = -0,1743·x - 0,0167
R. Sch.	g = -2,7143·r + 0,0102	y = -0,4151·x + 0,0969
U. W.	g = -2,6247·r - 0,4756	y = -0,3291·x + 0,0433

5) Neutrale Zone

Tab. 12 zeigt die Ergebnisse der Bestimmung der neutralen Zone für die fünf deuteranopischen Versuchspersonen (V, 4). Die Meßwerte wurden am Interferenzverlaufsfilter (IF in Abb. 3) abgelesen.

Tabelle 12

Deuteranop	R. Sch.	J.M.	P.V.	C. Sch.	U.W.
Wellenlänge der neutralen Zone (nm)	502	502	498	497,5	508

6) Ergebnisse bei der deuteranomalen Versuchsperson H. St.

Die Bestimmung von Fehlfarben gelang bei der deuteranomalen Versuchsperson unter Zuhilfenahme von Adaptationsmechanismen (58).

Die Gleichung der mittleren Fehlfarbe lautet:

$$\vec{f} = 0 \cdot \vec{B} + 1 \cdot \vec{G} - 0{,}3643 \cdot \vec{R}$$

Damit hat der Farbort der mittleren Fehlfarbe im WDW-System folgende Farbwertanteile:

$$g_F = 1{,}5730$$

$$r_F = -0{,}5730$$

Diese Daten wurden vom WDW-System mit der individuellen Matrix (IV, 4) der Versuchsperson H. St. ins CIE-System transformiert. Die entsprechende Gleichung für die mittlere Fehlfarbe im CIE-System lautet:

$$\vec{f} = -0{,}1831 \cdot \vec{X} + 0{,}0659 \cdot \vec{Y} + 0{,}0066 \cdot \vec{Z}$$

Damit ergeben sich folgende Normfarbwertanteile:

$$x_F = 1{,}6556$$

$$y_F = -0{,}5959$$

Die Abbildung 22 zeigt die Verwechslungsgeraden sowie den Farbort der mittleren Fehlfarbe im WDW-System.
Der Farbort des mittleren Quervektors zusammen mit dem Farbort der mittleren Fehlfarbe bestimmt die Spur der Alychne. Die Verwechslungsgerade der neutralen Zone ist mit offenen Quadraten gekennzeichnet.

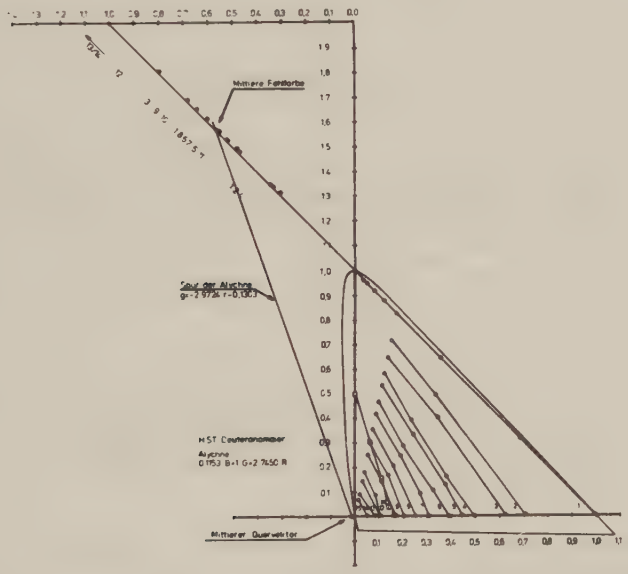


Abb. 22: Ergebnisse der Fehlfarbenbestimmung im WDW-System für die deuteranomale Versuchsperson H. St..

Folgende Gleichungen leisten den Übergang von der Trichromasie auf die Deuteranomalie:

$$\bar{k}(\lambda) = \bar{b}(\lambda)$$

$$\bar{w}(\lambda) = + 0{,}3643 \cdot \bar{g}(\lambda) + \bar{r}(\lambda)$$

Das Maximum der Kurve $\bar{w}(\lambda)$ liegt bei 579 nm.

Mit Hilfe quasiisochromer Helligkeitsabgleiche wurden vierzehn Quervektoren bestimmt. Die Gleichung für den mittleren Quervektor im WDW-System lautet:

$$\vec{q} = -15,3561 \cdot \vec{B} + 1,1195 \cdot \vec{G} + 0,2366 \cdot \vec{R}$$

Der Farbort des mittleren Quervektors im WDW-System wird bestimmt durch folgende Farbwertanteile:

$$g_Q = -0,0799$$

$$r_Q = -0,0169$$

Mit mittlerer Fehlfarbe und mittlerem Quervektor wurde eine mittlere Alychne berechnet:

$$O = 0,1153 \cdot B + 1 \cdot G + 2,7450 \cdot R$$

Mit der individuellen Matrix (IV, 4) wurde der Quervektor ins CIE-System transformiert:

$$\vec{q} = 0,1714 \cdot \vec{X} - 15,1403 \cdot \vec{Y} + 5,6016 \cdot \vec{Z}$$

Damit ergeben sich folgende Normfarbwertanteile:

$$x_Q = -0,0182$$

$$y_Q = 1,6162$$

Die Gleichung der mittleren Alychne im CIE-System lautet:

$$O = 0,6749 \cdot X + 1 \cdot Y - 0,0383 \cdot Z$$

Die lokal bestimmten Alychnen sind in Abb. 23 dargestellt. Sie sind von Gelb nach Blau fortlaufend numeriert. Auffallend sind die im Vergleich zu den Deuteranopen recht hohen roten Leuchtdichtebeiwerte.

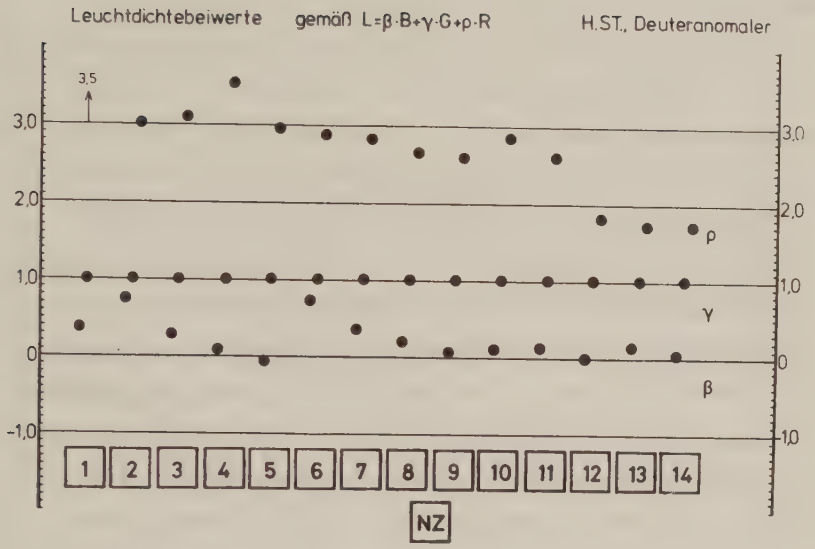


Abb. 23: Leuchtdichtebeiwerte β, γ und ρ für die deuteranomale Versuchsperson H. St. gemäß der Abneyschen Gleichung.

Die Schnittspur der Alychnenebene mit der Einheitsebene B + G + R = 1 ist gegeben durch die folgende Gleichung (s. Abb. 21):

$$g = -2{,}9724 \cdot r - 0{,}1303$$

Als Äquivalent einer neutralen Zone wurde die Stelle höchstmöglicher Entsättigung im Spektrum bestimmt (s. V, 4). Die am Interferenzverlaufsfilter (IF in Abb. 3) abgelesene Wellenlänge für die neutrale Zone ergab 498 nm.

VII. DISKUSSION

1) Fehlfarbe

Die Fehlfarbe charakterisiert den Typ der Dichromasie. Im dreidimensionalen Farbenraum des normalen Trichromaten stellt die Fehlfarbe einen Vektor dar, der die Richtung fehlender Farbunterscheidung des Dichromaten angibt. Mit ihr gelingt die Reduktion der Dichromasie aus der Trichromasie. Der Reduktion entspricht der Ausfall eines Zapfenpigmentes und der entsprechenden Grundspektralwertkurve. Die Grundspektralwertkurven sind die physiologisch bedeutsamen Spektralwertkurven; sie zeigen den Verlauf der spektralen Absorptionskurven der Zapfenpigmente, wobei die Absorption in den okularen Medien n i c h t berücksichtigt ist. Auf Helmholtz (27, S. 364ff.) und Maxwell (51) geht die Betrachtungsweise der Fehlfarbe als Grundvalenz zurück. In dieser Betrachtungsweise sind die Fehlfarben der drei Typen der Dichromasie die Primärvalenzen, auf die die Grundspektralwertkurven des normalen Trichromaten bezogen sind. So wird die relative Strukturarmut des dichromatischen Farbensehens benutzt, um Aufschluß über das kompliziertere trichromatische Farbensehen zu bekommen.

Die Methode der Fehlfarbenbestimmung wurde schon 1855 von Maxwell (51) beschrieben und von Nyberg und Yustova (56) wieder aufgegriffen. Dabei wird der Farbabgleich eines Trichromaten von einem Dichromaten wiederholt. Daß ein

Farbabgleich — vom Dichromaten auf zwei verschiedene Arten durchgeführt — genügt, setzt eine räumliche Berechnung voraus. Im Unterschied hierzu betrachtete Helmholtz (27, S. 364ff.) die Fehlfarbe in der trichromatischen Farbtafel. In dieser Anschauungsweise benötigt man vier Farbarten zur Bestimmung des Fehlpunktes, der dann der Schnittpunkt zweier Verwechslungsgeraden in der Farbtafel ist. Beide Methoden, sowohl die von Helmholtz beschriebene wie die von Maxwell überlieferte, führen allerdings nach Judd zum gleichen Ergebnis (82).

Vergleicht man die Ergebnisse der Fehlfarbenbestimmung bei den drei verschiedenen Typen der Dichromasie, so nimmt die Deuteranopie eine Sonderstellung ein. Von der Tritanopie ist recht wenig bekannt; eine Literaturübersicht wird von Walraven (110) angegeben. Bei der Protanopie streuen die Fehlpunkte interindividuell in einem nur kleinen Bereich. Paulus (58, 59) fand mit der gleichen Methode nur geringe interindividuelle Unterschiede für protanopische Fehlfarben. Anders bei der Deuteranopie: Tab. 1 zeigt die relativ große Streuung deuteranopischer Fehlfarben (R_F von -0,3660 bis -0,4805). Willmer (111) berichtet von einer noch größeren Streuung und teilt die Deuteranopie deshalb in zwei Typen ein (s. II, 3).

Als guter Vergleich für die Ergebnisse der Fehlfarbenbestimmung bietet sich die Arbeit von Nimeroff (57) an, der mit einem Donaldson-Colorimeter ebenfalls nach der Methode von Nyberg und Yustova deuteranopische Fehlfarben bestimmt hat, sowie die Arbeiten von Scheibner (88, 91) der eben-

falls mit einem Guildschen Dreifarbenmeßgerät arbeitete. Daß trotz der in der Literatur berichteten großen Streuung deuteranopischer Fehlfarben die von mir mitgeteilten Fehlpunkte (Abb. 4 - 8) alle in einem Bereich oberhalb der grünen Primärvalenzen liegen, ist Folge der speziellen Normierung (s. IV, 3).

Die Abbildungen 4 - 8 und 9 - 13 zeigen, daß die Fehlpunkte aller Versuchspersonen genau auf der Verlängerung der Rot-Dreiecksseite liegen. Dies ist keine notwendige Bedingung, sondern Folge der experimentellen Tatsache, daß keine der deuteranopischen Versuchspersonen den Anteil der blauen Primärvalenz ändern mußte. Zur besseren Vergleichbarkeit unserer Ergebnisse mit den Daten aus der Literatur habe ich alle Meßergebnisse in das System des farbmetrischen Normalbeobachters CIE 1931 transformiert. Die Unterschiede in den Transformationsmatrizen für die einzelnen Versuchspersonen (s. IV, 4) ergeben sich durch Normierung der Farbvalenz - repräsentiert durch das Filter VG 12 - mit der individuellen, deuteranopischen Trendelenburg-Gleichung. Die numerischen Unterschiede sind - wie in Absch. IV, 4 zu sehen ist - zwischen den einzelnen Versuchspersonen gering.

Auf eine statistische Auswertung der intraindividuellen Streuung der Fehlfarbe habe ich verzichtet. Der folgende Vergleich gilt den interindividuellen Unterschieden. Die Ergebnisse in Tab. 3 bestätigen die große Streuung deuteranopischer Fehlfarben, wie sie auch von anderen Autoren berichtet wird.

Tab. 13 zeigt einen Vergleich der deuteranopischen Fehl-

punkte von Scheibner (88, 91) und Kröger.

Tabelle 13

Scheibner (88, 91)			Kröger		
VP	x	y	VP	x	y
M. S.	1,3403	-0,3008	C. Sch.	1,4683	-0,4207
P. Ei.	1,6598	-0,5998	P. V.	1,2499	-0,2165
N. K.	1,5744	-0,5213	J. M.	1,2301	-0,1976
A. H.	1,4830	-0,4343	R. Sch.	1,6440	-0,5859
			U. W.	1,5005	-0,4505

In beiden Fällen streuen die Ergebnisse in etwa dem gleichen Bereich.

In der Literatur finden sich gute Übersichten bei Terstiege (99), Sugiyama (98) und Nimeroff (57). Folgende Tabelle entstand in Anlehnung an Terstiege (99) und Nimeroff (57). Sie bestätigen, wie wenig einheitlich die Ergebnisse der unterschiedlichen Autoren sind.

Tabelle 14

Autoren	x	y
Boynton u. Scheibner (15)	1,56	-0,56
Judd (31)	1	0
Kinney (35)	1,51	-0,51
König (39)	2,30	-1,30
Le Grand (47)	1,08	-0,08
Mac Adam (49)	1,75	-0,75
Nimeroff (57)	1,47	-0,47
Pitt (62)	1,29	-0,29
Nyberg u. Justova (56)	1,70	-0,70
Vos u. Walraven (103)	1,40	-0,40
Wright (112)	2,88	-1,73

Nimeroff fand mit derselben Methode einen sehr ähnlichen Wert (x = 1,47, y = -0,47), während Nyberg und Yustova mit x = 1,7, y = -0,70 etwas höher im Vergleich zu unseren Ergebnissen liegen. Judd (31) legt den deuteranopischen Fehlpunkt auf die trichromatische Alychnenspur; seinen theoretischen Überlegungen entspricht aber tatsächlich nur der von LeGrand (47) und Pitt (62) ermittelte Fehlpunkt in etwa, sie wurden überdies von Vos und Walraven (103) widerlegt. Die Betrachtung der Fehlfarbe als Kern einer homomorphen Abbildung eines dreidimensionalen Farbenraumes auf einen zweidimensionalen deuteranopischen führt zur Aufstellung der zwei deuteranopischen Spektralwertkurven $\bar{k}(\lambda)$ und $\bar{w}(\lambda)$ (s. VI, 2). Als gegebene

trichromatische Spektralwertkurven habe ich die des Farbmetrischen Normalbeobachters CIE 1931 zugrunde gelegt. Die Gleichungen, mit denen die Reduktionen durchgeführt wurden, finden sich in Tab. 4 (S. 59). Die kurzwellige, deuteranopische Spektralwertkurve $\bar{k}(\lambda)$ unterscheidet sich nicht von der trichromatischen $\bar{b}(\lambda)$-Kurve, weil keine der Versuchspersonen beim Farbabgleich für die Fehlfarbenbestimmung die blaue Mischungskomponente ändern mußte.

Die langwellige deuteranopische Spektralwertkurve $\bar{w}(\lambda)$ (s. Abb. 14) repräsentiert den erhalten gebliebenen langwelligen deuteranopischen Mechanismus und setzt sich additiv aus $\bar{r}(\lambda)$ und ungefähr der Hälfte aus $\bar{g}(\lambda)$ zusammen. Die Kurven sind bezogen auf die reellen Primärvalenzen des WDW-Systems und haben demzufolge negative Äste.

Eine Korrelation der langwelligen Spektralwertkurve $\bar{w}(\lambda)$ mit dem spektralen Absorptionsmaximum von Erythrolab ist deshalb nicht erlaubt (43).

Die Maxima der langwelligen deuteranopischen Spektralwertkurven $\bar{w}(\lambda)$ liegen zwischen 561 und 568 nm (s. Tab. 5). Zum Vergleich zeigt Tab. 15 die Maxima der $\bar{w}(\lambda)$-Kurven der deuteranopischen Versuchspersonen von Scheibner (91). Diese Wellenlängen habe ich unter Verwendung der von Scheibner ermittelten Fehlfarben und unter Zugrundelegung der Normalbeobachter CIE 1931 berechnet.

Tabelle 15

Maxima der deuteranopischen $\bar{w}(\lambda)$-Kurven nach Scheibner (91)

Deuteranop	λ_{max} von $\bar{w}(\lambda)$
M. S.	567 nm
P. Ei.	572 nm
N. K.	571 nm
A. H.	570 nm

2) Neutrale Zone

Die Wellenlängen der neutralen Zonen für die fünf deuteranopischen Versuchspersonen liegen in einem Bereich zwischen 498 und 508 nm (s. Tab. 12). Man vergleiche damit die von Massof (50) angegebenen Werte für sieben Deuteranope, bei denen er eine Streuung zwischen 495 und 505 nm fand. Bei Vogt (102) findet sich ein Wert von 498 nm. Graham (25) gibt einen Wert von 502 nm an.

Im Vergleich zu Protanopen zeigt sich eine deutliche Verschiebung der neutralen Zone zu längeren Wellenlängen: Für die protanopische neutrale Zone gibt Massof (50) z.B. einen Mittelwert von 490 nm an. Paulus kann diese Tendenz allerdings nicht bestätigen. Seine an protanopischen und protanomalen Versuchspersonen gefundenen Werte liegen in einem Bereich zwischen 492 und 508 nm.

3) Alychne

Die Gesamtheit einer parallelen Isolychnenschar einschließlich der zugehörigen Alychne stellt einen zweidimensionalen Teilraum des dreidimensionalen Farbenraumes dar (85). Alle Farbvektoren, die in einer Isolychne enden, besitzen die gleiche Helligkeit; alle innerhalb einer Isolychne liegenden Differenzvektoren sind luminanzfreie Chrominanzvektoren, d.h. sie tragen ausschließlich Farb- und keinerlei Helligkeitsinformation. Das gilt insbesondere für alle Quervektoren.

Im Abneyschen Gesetz der Form $L = \beta \cdot B + \gamma \cdot G + \rho \cdot R$ wird die Leuchtdichte L als Linearkombination der Farbwerte B, G, R angegeben. Man spricht von Leuchtdichtebeiwerten β, γ, ρ. Die Leuchtdichte verknüpft die Farbvalenzmetrik mit der Photometrie (84). Unter Farbvalenzmetrik versteht man die niedere Farbmetrik im Sinne Schrödingers (93), die ausschließlich auf dem Gleichheitsurteil beruht: In einem solchen System sind keine Abstände definiert. Die Beurteilung der Gleichabständigkeit von Farben gehört nach Schrödinger in das Gebiet der höheren Farbmetrik (66, S. 172ff.). In unserem System machen also gleiche Abstände im Farbenraum und in der Farbtafel keine Aussage über die Größe eines empfundenen Farbunterschiedes. Die Untersuchungen gingen allesamt nicht über das Gebiet der niederen Farbmetrik hinaus. Dies gilt insbesondere für die heterochromen Helligkeitsabgleiche zur Quervektorbestimmung (58).

Es wurden für jeden Ausgangsreiz mit Hilfe der dort lokal bestimmten Fehlfarbe und eines dazugehörigen Quervektors Alychnen bestimmt. Diese Punkt-für-Punkt-Alychnen sind in den Abb. 16 - 20 dargestellt. Sie geben die relativen Leuchtdichtebeiwerte für das Primärvalenzsystem $\vec{B}$(460 nm), $\vec{G}$(530 nm) und $\vec{R}$(650 nm) an. Zwischen der üblichen 1 : 1 Normierung nach Wright (112) und unserer speziellen deuteranopischen Normierung der Farbwerte B, G, R, die in die Berechnung der Leuchtdichtebeiwerte mit eingegangen ist, besteht folgender Zusammenhang (90):

$$B = B_d;\ G = G_d;\ R = 2{,}5 \cdot R_d$$

B_d, G_d und R_d sind Farbwerte in meiner speziellen deuteranopischen Normierung (s. IV, 3). Leuchtdichtebeiwerte transformieren sich wie die Primärvalenzen (s. II, 9). Also besteht folgender Zusammenhang für die zugehörigen Leuchtdichtebeiwerte:

$$\beta = \beta_d;\ \gamma = \gamma_d\ ;\ \rho = 0{,}4 \cdot \rho_d$$

Will man die in Tab. 9 angegebenen Leuchtdichtebeiwerte vergleichen, müssen die Werte für ρ mit 0,4 multipliziert werden. Sie liegen dann zwischen 0,8 und 1,0 und damit etwas niedriger als die von Scheibner gefundenen Werte (90), der einen Bereich zwischen 1,02 und 1,22 angibt.

Beim Deuteranopen wird die Gesamtleuchtdichte in der Hauptsache durch das verbliebene langwellige Pigment Erythrolab getragen (72, 73, 74, 90).

Bei der Versuchsperson R. Sch. (s. Tab. 9) wurde ein negativer mittlerer blauer Leuchtdichtebeiwerte ermittelt. Bei der lokalen Alychnenbestimmung schwankte β bei allen Deuteranopen im gelben Bereich um den Nullpunkt. Ein eindeutig negativer blauer Leuchtdichtebeiwert im gelben Bereich der Farbtafel, im Sinne einer Hemmung des Blaumechanismus kann aber nicht gefunden werden. Dieses Ergebnis wurde von Paulus (58) auch für die Protanopie gefunden.
Im Falle von negativen blauen Leuchtdichtebeiwerten schneidet die Alychnenspur den Spektralfarbenzug. Wie auf den Abb. 4 - 13 zu sehen ist, liegt die Gerade der Alychnenspur mit dem Farbort des Fehlpunktes und des Quervektors fest. Für jeden Fehlpunkt und den dazugehörigen Quervektor läßt sich eine Alychnenspur zeichnen.

Betrachtet man die Alychne als Kern einer homomorphen Abbildung, so resultiert aus der Reduktion eines dreidimensionalen Farbenraumes auf einen eindimensionalen eine Helligkeitsskala. Aus den drei trichromatischen Spektralwertkurven $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{r}(\lambda)$ wird eine spektrale Hellempfindlichkeitskurve $\bar{l}(\lambda)$ (42 , 43). Das Maximum einer solchen $\bar{l}(\lambda)$-Kurve entspricht in sehr großer Näherung dem der $\bar{w}(\lambda)$-Kurve (s. Abb. 14 und 21). In unserer Berechnung ist also λ_{max} allein abhängig von der deuteranopischen Fehlfarbe. Die Hellempfindlichkeitskurve $\bar{l}(\lambda)$ hat im Gegensatz zur $\bar{w}(\lambda)$-Kurve (Abb. 14 und 21) keinen negativen Ast im kurzwelligen Bereich, der auf die reellen Primärvalenzen zurüchzuführen ist (s. Abb. 21). In beiden Fällen scheint eine Korrelation des Maximum der $\bar{l}(\lambda)$-Kurve mit dem spektralen Absorptionsmaximum von Erythrolab

erlaubt; denn der Anteil der blauen Spektralwertkurve $\bar{b}(\lambda)$ an der spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion besteht signifikant nur in der positiven Schulter im kurzwelligen Bereich. Das Maximum der Kurve wird bestimmt durch das verbliebene langwellige Pigment Erythrolab (s. Abb. 21). Der blaue Mechanismus trägt praktisch nichts zur Gesamtleuchtdichte bei.
Die rechnerisch aus den trichromatischen Spektralwertkurven des farbmetrischen Normalbeobachters CIE 1931 gewonnenen Hellempfindlichkeitskurven sind in guter Übereinstimmung mit den in der Literatur experimentell ermittelten $V(\lambda)$-Kurven. Bowmaker et al. (14) bestimmte mikrospektralradiometrisch die spektralen Absorptionskurven der Photopigmente von Stäbchen und Zapfen bei Rhesus-Affen. Das Absorptionsmaximum von 40 "Rotzapfen" liegt bei 565 nm.
Smith und Pokorny (95) geben für den deuteranopischen langwelligen Mechanismus ein Maximum von 560 nm an.
Im gleichen Bereich liegen die Ergebnisse von Rushton (73), Vos und Walraven sowie Pitt (103, 62).

4) Testen der Clusterhypothese mit Hilfe des H-Tests

Im folgenden soll mit Hilfe eines statistischen Tests Alpern's Clusterhypothese (6, 7, 8) (s. II, 3) überprüft werden. Alpern folgert aus der Tatsache, daß es interpersonell kein einheitliches Absorptionsmaximum eines Zapfenpigmentes, sondern eine Streuung in einem bestimmten Wellenlängenbereich gibt, die Zapfenpigmente lägen in sog."Clustern"vor (6, 7, 8).

Das Erythrolabcluster enthält also nicht stets dasselbe Erythrolab, sondern eine Gruppe ähnlicher Pigmente.

Wie im letzten Abschnitt gezeigt wurde, entspricht das Maximum der $\bar{I}(\lambda)$-Kurve immer dem der $\bar{w}(\lambda)$-Kurve (s. Abb. 14 und 21). Wenn man also hauptsächlich an λ_{max} und seiner Streuung interessiert ist, kann man anstelle von $\bar{I}(\lambda)$ auch $\bar{w}(\lambda)$ betrachten.
Weil aber in unserem Falle alle $\bar{w}(\lambda)$-Kurven nicht direkt gemessen sind, sondern vom CIE-Normalbeobachter stammen, sind sie zur Testung dieser Hypothese nicht geeignet. Daher soll der Test auf die Fehlfarben beschränkt werden (42). Wir betrachten die Fehlfarbe in der Form:

$$\vec{f} = B_F \cdot \vec{B} + 1 \cdot \vec{G} + R_F \cdot \vec{R},$$

wobei R_F die einzige Variable ist, da B_F bis auf eine Ausnahme gleich Null ist. Die Anforderung an den statistischen Test war, zu prüfen, mit welcher Wahrscheinlichkeit die interindividuellen Fehlfarben aus einer Grundgesamtheit stammen. Unter dieser Fragestellung wurde der Kruskal- und Wallis H-Test durchgeführt (78). Er vergleicht mehrere unabhängige Stichproben. Die Nullhypothese sagt aus, daß alle Stichproben aus einer Grundgesamtheit stammen.
Unter der Nullhypothese ist die Prüfgröße für eine große Anzahl von Beobachtungen, wie in unserem Fall, χ^2-verteilt. In den Test wurden die deuteranopischen Fehlfarben von Scheibner (91) mit einbezogen. R_F wurde gemäß seiner Größe über alle Verwechslungsgeraden und Versuchspersonen rangiert (92) und die Prüfgröße H berechnet. Zugrunde lagen 9 Stichproben, wobei eine Stichprobe aus 10 - 15 individuellen

(zu den Verwechslungsgeraden gehörigen) Fehlfarben besteht. Der Freiheitsgrad ist damit 8.
Das Ergebnis war H = 72. Dieser Wert ist größer als der in der χ^2-Tabelle angegebene Wert für das Signifikanzniveau $\alpha = 0{,}1$. Das heißt, mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,1 % können die Fehlfarben der neun Deuteranopen nicht aus einer Grundgesamtheit stammen.
Scheibner (92) bestätigt dieses Ergebnis für die Gruppe seiner vier deuteranopischen Versuchspersonen. Der Grund für diese interindividuelle Variabilität kann nicht in einer unterschiedlichen Methodik zur Fehlfarbenbestimmung begründet sein. Apparatur und Methodik waren sowohl bei Scheibner (92) und in meiner Untersuchung immer die gleiche. Das Ergebnis des statistischen Tests spricht dafür, daß die Deuteranopen eine inhomogene Gruppe bilden im Sinne von Alpern's Clusterhypothese (6, 7).

5) Reduktionsdeuteranopie oder Fusionsdeuteranopie

Nach der wiederholt erwähnten Alpern'schen Clusterhypothese lägen beim trichromatischen Farbensehen drei Cluster von Zapfenpigmenten vor, einem kurzwelligen Cyanolab-Cluster, einem mittelwelligen Chlorolab-Cluster und einem langwelligen Erythrolab-Cluster (6, 7, 8).
Der Deuteranop hätte nach dieser Hypothese ein kurzwelliges Pigment aus dem Cyanolab-Cluster sowie ein langwelliges Pigment aus dem Erythrolab-Cluster. So erklärt Alpern Unter-

schiede im spektralen Absorptionsmaximum. Diese Ansicht schließt eine Fusion der beiden langwelligen Pigmente, wie Leber (46) und Fick (23) sie annahmen, aus.
Der Gedanke, daß der Deuteranopie sowohl eine Reduktion als auch eine Fusion zugrundeliegen kann, findet sich bei Willmer (111). Er fand auf der einen Seite Deuteranopen mit der gleichen Hellempfindlichkeitskurve wie bei einem normalen Trichromaten, auf der anderen Seite aber auch Deuteranopien mit einer deutlich zu langen Wellenlängen verschobenen Hellempfindlichkeitskurve (s. II, 3). In einer Überprüfung dieses Resultats kam Alpern (4) zu dem Ergebnis, daß die zwei Typen von Deuteranopen allein durch unterschiedliche Makulapigmentierung zu erklären seien.
Dettmar (18) greift die Idee der Fusion nach der Fickschen Verschiebungshypothese wieder auf. Sie sagt aus: "..., daß bei dichromatischen Systemen die Erregbarkeitskurve der einen Komponente mit der anderen identisch geworden ist, daß aber die betreffende Komponente mit ihren spezifischen Sinnesempfindungen an sich erhalten bleibt" (18, S. 1). Diese Möglichkeit wurde von Vos und Walraven (103) in detaillierten theoretischen Überlegungen als unwahrscheinlich zurückgewiesen Mit mikrospektralradiometrischen Messungen konnten Alpern (6, 7, 8) und Rushton (76) nur ein langwelliges Pigment beim Deuteranopen nachweisen, dessen spektrales Absorptionsmaximum mit einer gewissen Variationsbreite dem des Erythrolab entspricht.

Die experimentellen Ergebnisse meiner Untersuchungen zeigen, daß die Deuteranopen keine homogene Gruppe sind. Dieses Ergebnis wird von Pauls (58) für die Protanopen teilweise bestätigt. Unter fünf Protanopen kamen drei aus einer Population, einer zeichnete sich durch ungewöhnlich hohe Blaue Leuchtdichtereferenzwerte aus, während ein weiterer offensichtlich ein verändertes Blaupigment besaß.
Die Interpretation der interindividuellen Variabilität der deuteranopischen Fehlpunkte im Sinne von Alpern's Clusterhypothese erscheint daher sinnvoll und berechtigt.

9 Deuteranomalie

Die Deuteranomalie ist eine Form der anomalen Trichromasie. Statt des Deuteranopenpigmentes Chlorolab des normalen Trichromaten besitzt der Deuteranomale das Pigment Deutanolab. In der klassischen Auffassung ist das Absorptionsmaximum von Deutanolab zu längeren Wellenlängen verschoben (97).
Die von Alpern weiterentwickelte Clusterhypothese sagt aus, daß realistisch das Erythrolab alleinexistent sein kann (§ 1) und daß Deuteranopie und Protanopie aus einem Cluster stammen. Demnach basierte die Deuteranomalie Farbensehen auf einem kurzwelligen Pigment aus dem Cyanolab-Cluster und zwei unterschiedlichen Pigmenten aus dem langwelligen Cluster (§ 1).
Die Bestimmung von Fehlfarben gelingt beim Deuteranomalen nur unter Inkaufnahme von Adaptationsmechanismen. Damit wird die anomale Trichromasie auf die Dichromasie reduziert. Die so

ermittelte mittlere Fehlfarbe der deuteranomalen Versuchsperson H. St. entspricht denen der deuteranopischen Versuchspersonen (s. Tab. 2). Der mittlere Fehlpunkt (g = 1,5730, r = -0,5730) ist praktisch identisch mit dem der deuteranopischen Versuchsperson R. Sch. (g = 1,5772, r = -0,5772). Dieses Ergebnis bestätigt die Reduktion der Deuteranomalie auf die Deuteranopie.

Eine gute Übereinstimmung mit deuteranopischen Ergebnissen zeigt sich auch bei der Alychnenbestimmung sowie bei der errechneten $\bar{w}(\lambda)$- und $\bar{I}(\lambda)$-Kurve (s. VI, 2 und 4). Stöcker (97) bestimmte außer Fehlfarben und Alychnen auch Spektralwertkurven bei Deuteranomalen und fand eine Verschiebung der $\bar{g}(\lambda)$-Kurve deutlich zu längeren Wellenlängen, in einem Fall um 11 nm. Außerdem fand er eine Verschiebung der langwelligen Spektralwertkurve $\bar{r}(\lambda)$ in der gleichen Richtung, in einem Fall um 18 nm. Jedoch beschreibt er bei einer Versuchsperson auch eine Verschiebung der $\bar{r}(\lambda)$-Kurve um 8 nm zu kürzeren Wellenlängen. Vogt (102) erhielt bei seinen deuteranomalen Versuchspersonen eine nur sehr geringe Verschiebung der $\bar{g}(\lambda)$-Kurve sowie eine Verschiebung des Maximum der $\bar{r}(\lambda)$-Kurve zu längeren Wellenlängen.

Rushton (77) gibt das Absorptionsmaximum des Deutanolab bei 555 nm an.

Scheibner (87) ließ Farbabgleiche eines Deuteranomalen von Trichromaten, Deuteranopen und Protanopen beurteilen. Nach ihm ist die Deuteranopie eine Reduktionsform der Deuteranomalie Das spricht dafür, daß Deuteranomale und Deuteranope dasselbe langwellige Zapfenpigment Erythrolab haben, ein Ergebnis, das

nicht unbedingt in Einklang mit Alpern's Clusterhypothese steht.

VIII. ZUSAMMENFASSUNG

An fünf Deuteranopen und einem Deuteranomalen wurden Fehlfarben und Alychnen gemessen. Die Fehlfarben dienten als als Kern einer homomorphen Abbildung eines dreidimensionalen auf einen zweidimensionalen Farbenraum. Mit Hilfe dieses Homomorphismus konnten aus den drei trichromatischen Spektralwertkurven des farbmetrischen Normalbeobachters die zwei deuteranopischen Spektralwertkurven errechnet werden.

In der Lage der deuteranopischen Fehlpunkte fand sich keine Übereinstimmung mit den von Pitt und Judd, jedoch eine gute Übereinstimmung mit den von Scheibner berichteten Ergebnissen.

Die Reduktion eines dreidimensionalen Farbenraumes auf einen eindimensionalen Helligkeitsraum gelang mit Hilfe der Alychne. Das Ergebnis war eine spektrale Hellempfindlichkeitskurve des Deuteranopen.

Vereinzelt fanden sich bei den intraindividuell bestimmten Alychnen im gelben Bereich negative blaue Leuchtdichtebeiwerte, die allerdings nicht im Sinne einer Hemmung des Blaumechanismus zu deuten sind.

Die langwellige deuteranopische Spektralwertkurve $\bar{w}(\lambda)$ und die spektrale Hellempfindlichkeitskurve $\bar{l}(\lambda)$ zeigten in allen Fällen dasselbe Maximum. Ein Vergleich dieser Ergebnisse mit dem spektralen Absoptionsmaximum des Zapfenpigmentes Erythrolab anhand von Literaturdaten ergab eine gute Übereinstimmung.

Die statistische Prüfung ergab, daß die Fehlfarben bzw. das langwellige Sehpigment der deuteranopischen Versuchspersonen nicht aus einer Grundgesamtheit stammen. Dieses Ergebnis wurde im Sinne von Alpern's Clusterhypothese interpretiert.

Mit Hilfe von Adaptationsmechanismen ließ sich die Deuteranomalie auf die Deuteranopie reduzieren. Dies spricht für e i n alteriertes Pigment des anomalen Trichromaten.

IX. SCHRIFTTUM

1. AITKEN, J., On colour and colour sensations. Trans. Roy. Soc. Arts. 8 (1872), S. 375-418

2. ALPERN, M. and W. A. H. RUSHTON, The specifity of the cone interaction in the after-flash effect. J. Physiol. 176 (1965), S. 473-482

3. ALPERN, M. and S. TORII, The luminosity curve of the deuteranomalous fovea. J. Gen. Physiol. 52 (1968), S. 738-749

4. ALPERN, M., J. MINDEL and S. TORII, Are there two types of deuteranopes? J. Physiol. 199 (1974), S. 648-674

5. ALPERN, M., What is it that confines in a world without color? Invest. Ophthalmol. 136 (1974), S. 648-674

6. ALPERN, M. and T. WAKE, Cone pigments in human deutan colour vision defects. J. Physiol. 266 (1977), S. 595-612

7. ALPERN, M. and E. N. PUGH, Variation in the action spectrum of Erythrolabe among deuteranopes. J. Physiol. 266 (1977), S. 613-646

8. ALPERN, M. and J. MOELLER, The red and green cone visual pigments of deuteranomalous trichromacy. J. Physiol. 266 (1977), S. 647-675

9. ANGIER, R. P., Vergleichende Bestimmungen der Peripheriewerte des trichromatischen und des deuteranopischen Auges. Z. Psychol. und Physiol. Sinnesorgane 37 (1904), S. 401-413

10. BAKER, H. D. and W. A. H. RUSHTON, The red-sensitive pigment in normal cones. J. Physiol. 176 (1965), S. 56-72

11. BECK, H. und M. RICHTER, Neukonstruktion des Dreifarbenmeßgerätes nach Guild-Bechstein. Farbe 7 (1958), S. 141-152

12. BOUMA, P. J., Farbe und Farbwahrnehmung. Philips Techn. Bibl., Eindhoven 1951

13. BOUMAN, M. A. and P. L. WALRAVEN, Quantum theory of colour discrimination of dichromats. Vision Res. 2 (1962), S. 177-187

14. BOWMAKER, J. K., H. J. A. DARTNALL, J. N. LYTHGOE and J. D. MOLLON, The visual pigments of rods and cones on the Rhesus monkey. J. Physiol. 274 (1978), S. 329-348

15. BOYNTON, R. M. and H. SCHEIBNER, On the perception of red by "red-blind" observers. Acta Chromatica 1 (1967), S. 205-220

16. BRINDLEY, G. S. and E. N. WILLMER, The reflexion of light from the macular and peripheral fundus oculi in man. J. Physiol. 116 (1952), S. 350-356

17. BROWN, P. K. and G. Wald, Visual pigments in single rods and cones of the human retina. Science 144 (1964), S. 45-52

18. DETTMAR, P., Die Ficksche Verschiebungshypothese zur Deutung der Farbenfehlsichtigkeiten in einer Modellrechnung zur Datenverarbeitung beim gestörten Farbensehen des Menschen. Kybernetik 12 (1972), S. 1-7

19. DEUTSCHE NORMEN. DIN 5033 "Farbmessung" (1954 ff.); DIN 5031 "Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik" (1967 ff.)

20. DRESLER, A., The non-additivity of heterochromatic brightness. Trans. Illum. Engng. Soc. 18 (1953), S. 141-165

21. EXNER, F., Zur Kenntnis der Grundempfindungen im Helmholtz'schen Farbensystem. Sitzungsberichte d. K. Akademie d. Wissensch., Wien IIa 129 (1920), S. 27-47

22. FARBNORMENAUSSCHUSS Farbe. Anweisung für die Untersuchung des Farbensehens mit dem Anomaloskop nach Nagel. Farbe 6 (1957), S. 115-119

23. FICK, A., Zur Theorie der Farbenblindheit. Phys.-med. Verh., Würzb. 5 (1874), S. 158-162

24. FISCHER, G., Lineare Algebra. Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, 1975, S. 99 ff.

25. GRAHAM, C. H. and Y. HSIA, Color blindness and color theory. A. M. A. Archives of Ophthal. 60 (1958), S. 792-799

26. GRÜTZNER, P., Beitrag zur Frage der spektralen Hellempfindlichkeit bei angeborenen Farbsinnstörungen. Graefes Arch. Ophthalm. 164 (1962), S. 411-420

27. HELMHOLTZ, H., Handbuch der Physiologischen Optik. Zweite umgearbeitete Auflage. Voss, Hamburg und Leipzig 1896

28. HURVICH, L. M. and D. JAMESON, Color theory and abnormal red-green vision. Documenta Ophthalmologica XVI (1962), S. 411-442

29. HURVICH, L. M. and D. JAMESON, Human color perception, an essay review. Am. Sci. 57 (1969), S. 143-166

30. JAEGER, W., Systematische Untersuchungen über "inkomplette" angeborene totale Farbenblindheit. Graefes Arch. Ophthal. 150 (1950), S. 509-528

31. JUDD, D. B., Fundamental studies of color vision from 1860 to 1960. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 55 (1966), S. 1313-1330

32. KALMUS, H., The distribution of the spectral locus of "Unique Green" in samples of normal trichromats. Ann. Hum. Genet. 35 (1972), S. 369-374

33. KING-SMITH, P. E., The optical density of erythrolabe determined by a new method. J. Physiol. 230 (1973), S. 551-560

34. KING-SMITH, P. E., The optical density of erythrolabe determined by retinal densitometry using the self-sceening method. J. Physiol. 230 (1973), S. 535-549

35. KINNEY, J. A. S., Induced colors seen by a deuteranope. J. Opt. Soc. Am. 57 (1967), S. 1149-1154

36. KLAUDER-STADE, A., Dissertation, Düsseldorf, in Vorbereitung

37. KÖNIG, A., Zur Kenntnis dichromatischer Farbensysteme. Wiedemanns Ann. Physik u. Chemie 22 (1884), S. 567-578

38. KÖNIG, A. und C. DIETERICI, Die Grundempfindungen und ihre Intensitätsverteilung im Spektrum. Sitz. Ber. Akad. Wiss. Berlin 1886, S. 805-829

39. KÖNIG, A., Gesammelte Abhandlungen zur Physiologischen Optik, hrg. v. Th. Engelmann, Leipzig: J.A. Barth 1903

40. KOHLRAUSCH, A., Das Arbeiten mit dem Helmholtz-Königschen Spektralfarbenmischapparat. Farbe 1 (1952/53), S. 11-23, 67-76

41. v. KRIES, J., Über einen Fall von einseitiger angeborener Deuteranomalie (Grünschwäche). Zeitschrift f. Sinnesphysiologie 50 (1918), S. 137-152

42. KRÖGER, A. und H. SCHEIBNER, Deuteranopic spectral luminous curves derived from blind fundamental and alychne, Regional Symposium on Color Vision Deficiencies, 5-6, Sept. 1978, Dresden

43. KRÖGER, A. und H. SCHEIBNER, Reduktion der Deuteranopie aus der Trichromasie. Ber. Dtsch. Ophthal. Ges. 75 (im Druck)

44. LANG, H., Farbmetrik und Farbfernsehen. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1978

45. LAGALLY, M., W. FRANZ, Vorlesungen über Vektorrechnung. Akademische Verlagsgesellschaft, Geest u. Portig K.-G., Leipzig (1959), S. 391 ff.

46. LEBER, TH., Über die Theorie der Farbenblindheit und über die Art und Weise, wie gewisse, der Untersuchung von Farbenblinden entnommene Einwände gegen die Young-Helmholtzsche Theorie sich mit derselben vereinigen lassen. Klin. Mbl. Augenheilkunde 11 (1873), S. 467-473

47. LeGRAND, Y., Light, colour and vision. London: Chapman α Hall 1957, 2. Aufl.

48. MacADAM, D. L., Dependence of color-mixture functions on choice of primaries. J. Opt. Soc. Am. 43 (1953), S. 533-538

49. MacADAM, D. L., Color essays. J. Opt. Soc. Am. 65 (1975), S. 483-492

50. MASSOF, R. W. and J. BAILLY, Achromatic points in protanopes and deuteranopes. Vision Res. 16 (1976), S. 53-57

51. MAXWELL, J. C., Experiments on colour, as perceived by the eye, with remarks on colour-blindness. Trans. Roy. Soc. Edinburgh 21 (1855/57), S. 275-297

52. MILLER, S. S., Psychophysical estimates of visual pigment densities in redgreen dichromats. J. Physiol. 223 (1972), s. 89-107

53. MITCHELL, D. E. and W. A. H. RUSHTON, Visual pigments in dichromats. Vision Res. 11 (1971), S. 1033-1043

54. MITCHELL, D. E. and W. A. H. RUSHTON, The red/green pigments of normal vision. Vision Res. 11 (1971), S. 1045-1056

55. NAGEL, W., Über typische und atypische Farbensinnstörungen. Zeitschr. f. Psychologie und Physiolog. d. Sinnesorgane 43 (1909), S. 299-314

56. NYBERG, N. D. and E. N. YUSTOVA, Researches on dichromatic vision and the spectral sensitivity of the receptors of trichromats. In: Visual problems of colour, Symposium No. 8, Teddington 1957, London HMS 1958, Bd. 2, S. 475-486

57. NIMEROFF, I., Deuteranopic convergence point. J. Opt. Soc. Am. 60 (1970), S. 966-969

58. PAULUS, W., Fehlfarben und Alychnen von Protanopen und Protanomalen und ihre Bedeutung für das Farbensehen der normalen Trichromaten. Dissertation Düsseldorf 1978

59. PAULUS, W. und H. SCHEIBNER, Fehlfarben und Univarianz. 75. Zusammenkunft der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft in Heidelberg 1977 (im Druck)

60. PIANTANIDA, T. P. and H. G. SPERLING, Isolation of a third chromatic mechanism in the deuteranomalous observer. Vision Res. 13 (1973), S. 2049-2058

61. PICKFORD, R. W., A pedigree showing variability in deuteranomaly. Vision Res. 8 (1968), S. 469-474

62. PITT, F. H. G., Characteristics of dichromatic vision . Med. Res. Council Rep. of the Com. upon the Physiol. of Vision. XIV. Special Report Series 200 (London 1935)

63. POKORNY, J. and V. C. SMITH, Luminosity and CFF in deuteranopes and protanopes. J. Opt. Soc. Am. 62 (1972), S. 111-117

64. POKORNY, J. and J. D. MORELAND and V. D. SMITH, Photopigments in anomalous trichromats. J. Opt. Soc. Am. 65 (1975), S. 1522-1524

65. RICHARDS, W. and S. M. LURIA, Recovery and spectral sensitivity curves for color anomalous observers. Vision Res. 8 (1968), S. 929-938

66. RICHTER, M., Einführung in die Farbmetrik. Berlin-New York, W. de Gruyter, Sammlung Göschen, 1976

67. RICHTER, M., Grundriss der Farbenlehre der Gegenwart. Wiss. Forschungsberichte, Naturw. Reihe, Band 51, Dresden, Steinkopff 1940

68. RICHTER, M. und H. TERSTIEGE, Demonstration der Entstehung von Spektralwertkurven. Farbe 17 (1968), S. 209-223; Nr. 1/6

69. RIPPS, H. and R. A. WEALE, Cone pigments in the normal human fovea. Vision Res. 3 (1963), S. 531-543

70. RUSHTON, W. A. H., Visual pigments in man. Scientific American 207 (1962), S. 120-132

71. RUSHTON, W. A. H., Colour blindness and cone pigments. Am. J. Optom. Physiol. Opt. 41 (1964), S. 265-281

72. RUSHTON, W. A. H. and H. D. BAKER, Red/green sensitivity in normal vision. Vision Res. 4 (1964), S. 75-85

73. RUSHTON, W. A. H., A foveal pigment in the deuteranope. J. Physiol. 176 (1965), S. 24-37

74. RUSHTON, W. A. H., Cone pigment kinetics in the deuteranope. J. Physiol. 176 (1965), S. 38-45

75. RUSHTON, W. A. H., D. S. POWELL and K. D. WHITE, Exchange thresholds in dichromats. Vision Res. 13 (1973), S. 1993-2002

76. RUSHTON, W. A. H., D. S. POWELL and K. D. WHITE, The spectral sensitivity of "red" and "green" cones in the normal eye. Vision Res. 13 (1973), S. 2003-2015

77. RUSHTON, W. A. H., D. S. POWELL and K. D. WHITE, Pigments in anomalous trichromats. Vision Res. 13 (1973), S. 2017-2031

78. SACHS, L., Statistische Auswertungsmethoden. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 3. Auflage, S. 238-240

79. SCHEIBNER, H., Adaptive color shifts. J. Opt. Soc. Am. 56 (1966), S. 938-942

80. SCHEIBNER, H., On colours of the same appearance. Optica Acta 13 (1966), S. 205-210

81. SCHEIBNER, H., Trichromasie, Dichromasie, Monochromasie. Optica Acta 15 (1968), S. 329-338

82. SCHEIBNER, H., Dichromasie als Homomorphismus der Trichromasie. Optica Acta 15 (1968), S. 339-349

83. SCHEIBNER, H. and R. M. BOYNTON, Residual red-green discrimination in dichromats. J. Opt. Soc. Am. 58 (1968), S. 1151-1158

84. SCHEIBNER, H., Zum Verhältnis der Photometrie zur Farbmetrik. Lichttechnik 21 (1969), S. 107A-110A

85. SCHEIBNER, H., Über die Begriffe Farbvalenz, Farbart und Chrominanz in der Farbmetrik. Farbe 18 (1969), S. 221-232

86. SCHEIBNER, H., Untersuchungen zur Deuteranomalie. Ber. Deutsch. Ophthalm. Ges. 1972, S. 290-295

87. SCHEIBNER, H., Eine verbandstheoretische Klassifikation der Protanomalie und Deuteranomalie. Optica Acta 21 (1974), S. 489-496

88. SCHEIBNER, H., Missing colours (Fehlfarben) of deuteranopes and extreme deuteranomalous observers. In: Colour Vision Deficiencies III (Hrsg. v. G. Verriest) (= Modern Problems in Ophthalmology, Bd. 17), Basel: Karger 1976, S. 21-26

89. SCHEIBNER, H., Prüfung von Farbsinnstörungen. Med. Klin. 71 (1976), S. 1452-1459

90. SCHEIBNER, H. und N. BOLL, Bestimmung der Alychne von Deuteranopen und extremen Deuteranomalen. In Vorbereitung

91. SCHEIBNER, H. und O. LUDWIG, Bestimmung der Fehlfarben von Deuteranopen und extremen Deuteranomalen. In Vorbereitung

92. SCHEIBNER,H., O. LUDWIG und C. HÜBNER, Deuteranopie und extreme Deuteranomalie. In Vorbereitung

93. SCHRÖDINGER, E., Grundlinien einer Theorie der Farbmetrik im Tagessehen. Ann. Physik (IV) 63 (1920), S. 397-456, 471-520

94. SEEBECK, A., Über den bei manchen Personen vorkommenden Mangel an Farbensinn. Ann. Physik 42 (1837), S. 177 ff.

95. SMITH, V. C. and J. POKORNY, Spectral sensitivity of color-blind observers and the cone photopigments. Vision Res. 12 (1972), S. 2059-2071

96. SMITH, V. C. and J. POKORNY, Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. Vision Res. 15 (1975), S. 161-171

97. STÖCKER, H., Erythrolab und Deuteranomalie. 76. Zus. Dtsch. Ophthalm. Ges. (im Druck)

98. SUGIYAMA, Y., On the fundamental sensations. Farbe 23 (1974), S. 255-278

99. TERSTIEGE, H., Untersuchungen zum Persistenzsatz und Koeffizientensatz. Farbe 16 (1967), S. 1-111

100. TRENDELENBURG, W., Zur Kenntnis des abnormen Farbensinns und seiner Vererbung. Abh. Preuß. Akad. Wiss. (1941), (Math.-naturw. Klasse), Nr. 6, Berlin, W. de Gruyter

101. VOGT, G., Aufstellung von Spektralwertfunktionen aus einer Folge von Farbgleichheitseinstellungen für Spektrallichter verschiedener Wellenlängen von Personen mit angeborener anomaler Trichromasie und Dichromasie. Farbe 23 (1974), S. 51-107

102. VOGT, G., Spectral mixture curves with interference filters for dichromatic and anomalous trichromatic subjects of the red/green type. In: Colour Vision Deficiencies III (Hrsg. v. G. Verriest) (= Modern Problems in Ophthalmology, Bd. 17), Basel Karger 1976, S. 211-214

103. VOS, J. J. and P. L. WALRAVEN, On the derivations of the foveal receptor primaries. Vision Res. 11 (1970), S. 799-818

104. WAGNER, H. G., Deuteranopie: Fusions- oder Ausfall-Dichromasie? Farbe 20 (1971), S. 317-326

105. WALD, G., The receptors of human color vision. Science 145 (1964), S. 1007-1017

106. WALD, G. and P. K. BROWN, Human color vision and color blindness. Cold Spring Harbor Symp. on Quant. Biology 30 (1965), S. 345-361

107. WALD, G., Defective color vision and its inheritance. Proc. N. A. A. 55 (1966), S. 1347-1363

108. WALD, G., Gibt es zwei verschiedene Typen von Deuteranopie? Ber. Dtsch. Ophthal. Ges. 67 (1966), S. 272-273

109. WALLS, G. L. and G. G. HEATH, Neutral points in 138 protanopes and deuteranopes. J. Opt. Soc. Am. 46 (1956), S. 640-649

110. WALRAVEN, P. L., A closer look at the tritanopic convergence point. Vision Res. 14 (1974), S. 1339-1343

111. WILLMER, E. N., Further observations on the properties of the central fovea in color-blind and normal subjects. J. Physiol. 110 (1949), S. 442-446

112. WRIGHT, W. D., Researches on normal and defective colour vision. Kimpton, London 1946

113. WYSZECKI, G. and W. S. STILES, Color science. New York: Wiley 1967

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Lehrer Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Scheibner für die gute Betreuung meiner Dissertation und für viele anregende Diskussionen.

Für seine ermunternde Unterstützung danke ich Herrn Prof. Dr. J. Haase.

Meinen Kollegen Herrn Dipl.-Physiker Elmar Wolf, Herrn Dr. Sinclair Cleveland und Herrn Dr. Walter Paulus danke ich herzlich für hilfreiche Diskussionen und tatkräftige Unterstützung.

Den Mitarbeitern des II. Physiologischen Instituts, besonders Frl. Maria Antoniadu und Frl. Monika Grigowski, danke ich für die technische Hilfe bei der Fertigstellung meiner Dissertation.

L E B E N S L A U F

19. 07. 1952:	in Gelsenkirchen als erstes Kind von Adolf Kröger und Hildegard Kröger, geb. Twiste geboren
1959-1963:	Volksschule in Bochum-Weitmar
1963-1971:	Staatl. Hildegardisschule, Gymnasium für Mädchen, in Bochum
WS 1971/72:	Studium der Chemie an der Ruhr-Universität in Bochum
SS 1972- WS 1977/78:	Studium der Medizin an der Universität Düsseldorf
März 1973:	Vorphysikum
März 1974:	Physikum
März 1975:	Erster Teil des Staatsexamens
März 1977:	Zweiter Teil des Staatsexamens
April 1978:	Ärztliche Prüfung
8. Juni 1978:	Approbation als Arzt
ab SS 1976:	Dissertation am II. Physiologischen Institut der Universität Düsseldorf unter der Betreuung von Prof. Dr. Scheibner

FOTODRUCK J. MAINZ — Telefon: (02 41) 2 73 05
Neupforte 13, Nähe Markt, 5100 Aachen